



**Etude de la diversité des communautés lombriciennes  
dans la Réserve et Domaine de Chasse de  
Bombo-lumene, plateau des Batékés**  
Fils Milau

► **To cite this version:**

Fils Milau. Etude de la diversité des communautés lombriciennes dans la Réserve et Domaine de Chasse de Bombo-lumene, plateau des Batékés. Biodiversité et Ecologie. Université de Kinshasa, 2016. Français. <NNT : 2016SGA1904>. <tel-01343677>

**HAL Id: tel-01343677**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01343677>**

Submitted on 9 Jul 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# UNIVERSITE DE KINSHASA



## FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

### DEPARTEMENT DE GESTION DES RESSOURCES NATURELLES

BP : 117 KINSHASA XI.

---

*Etude de la diversité des communautés lombriciennes dans  
la Réserve et Domaine de Chasse de Bombo-lumene,  
plateau des Batékés*

---

#### THESE

*Pour l'obtention du grade de docteur en Sciences Agronomiques*

*Option : Gestion des Ressources Naturelles*

*Présentée par :*

**Fils MILAU EMPWAL**

*Soutenue publiquement le 19 Avril 2016, devant le jury composé de :*

- |                                    |                              |
|------------------------------------|------------------------------|
| 1. Prof. SUMBU ZOLA LEZI Eric      | : Doyen et Président du jury |
| 2. Prof. PALATA KABUDI Jean-Claude | : Secrétaire du jury         |
| 3. Prof. FRANCIS Frédéric          | : Promoteur (Nord)           |
| 4. Prof. KACHAKA SUDI KAIKO Claude | : Promoteur (Sud)            |
| 5. Prof. ALONI KOMANDA Jules       | : Membre                     |
| 6. Prof. LEMA KI MUNSEKI Albert    | : Membre suppléant           |
| 7. Prof. IFUTA NDEY Séraphin       | : Membre suppléant           |

## **Dédicace**

A ma tendre épouse Judith Osiong,

Quand je t'ai connu, j'ai trouvé la femme de ma vie, mon âme sœur et la lumière de mon chemin. Ma vie à tes côtés est remplie de belles surprises, tes sacrifices, ton soutien moral, matériel et spirituel et ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études. Sans ton aide et tes encouragements cette thèse n'aurait vu le jour. Que Dieu unisse notre chemin à jamais et que cette thèse soit le témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.

A mes enfants,

Espérant des lendemains épiques et un avenir glorieux, je souhaite que ce fruit de mes efforts effrénés jours et nuits nous mène vers le bonheur fleuri.

## Remerciements

Je témoigne ma plus vive reconnaissance aux professeurs Claude Kachaka Sudi et Frédéric Francis, mes deux directeurs de thèse. Merci à vous pour la confiance, la disponibilité et pour les heures de relecture du manuscrit. Merci au professeur Jules Aloni Komanda, mon co-directeur pour m'avoir transmis la rigueur de travail et m'avoir initié à la biologie du sol, toujours dans la bonne humeur.

Un grand merci au professeur Jean-Claude Palata Kabudi pour de nombreuses discussions sur l'écologie des communautés lombriciennes, mais aussi pour m'avoir accueilli au sein du projet Kin-06 et m'avoir permis de réaliser mes études de DEA et de doctorat.

Je remercie beaucoup les professeurs Guy Mergeai et Pierre Vanderwalle pour leur confiance, leur patience, et leurs conseils indispensables à ma maturation scientifique. Merci à toute l'équipe de la CIUF-CUD/ Projet Kin-06, qui, par le financement qui m'a été accordé, m'a permis de travailler sereinement.

Un immense merci à Aboulkacem Lemtiri et à toute l'équipe du laboratoire de l'Unité d'Entomologie Fonctionnelle et Evolutive, Gembloux Agro-Bio Tech d'avoir accepté la tâche d'identification des échantillons de vers de terre et des échantillons des sols. Je tiens également à remercier les assistants Erick Bukaka Wakini Yeto et Naomie Mvumbi Madidila d'avoir aidé à analyser les données et de m'avoir permis de réaliser un stage très enrichissant en biostatistique et analyse des données.

Le prélèvement des échantillons et le tri manuel des vers de terre auraient été impossibles sans l'aide de plusieurs personnes. Merci à Ewing Lopongo Bongo, Judith Nda, Chanelle Mboma et Baudouin Matuba pour leur soutien. Merci aux gardes forestiers qui m'ont fait découvrir le site de Bombo-Lumene et m'ont aidé à échantillonner des quantités importantes de vers de terre et de sols.

Je tiens à témoigner ma gratitude aux professeurs Félix Kabata et Augustin Mbangala Mapapa pour les conseils, l'attention et l'aide financière qu'ils n'ont jamais hésité d'apporter à mes études. Je dis également merci aux professeurs Paul Boyamba Simba et Dieudonné Musibono Eyal'anki, d'avoir relu entièrement cette thèse à la recherche de toutes les fautes et coquilles.

Un très chaleureux remerciement aux chefs des travaux Marcelline Ngomba Ndekelu, Pyclaude Bolaluembe Boliale, Bonaventure et Lele Nyami de m'avoir encouragé et de m'avoir guidé scientifiquement quand j'en avais le plus besoins.

Un grand merci aux doctorants Carmel Kifukieto Manzanza, Max Mungyeko Mayola et René Gizanga Valu qui ont bien voulu partager passionnément leur bonne humeur sur le terrain de recherche et qui m'ont toujours été d'un soutien précieux.

Merci à Nene Meslazol, Dada Adia, José Essy, Chimène Ampom, Ingrid Yass, Jessé Nzuzi et Vitaline Kaloso, vous avez toujours été présents pour les bons conseils. Votre affection et votre soutien m'ont été un grand secours tout au long de ma vie professionnelle et personnelle. Veuillez trouver dans ce travail ma reconnaissance pour tous vos efforts.

Je remercie chaleureusement mes amis (es) pour leur aide précieuse et leur soutien au quotidien. Merci à Junior Kalala Mukulumpa, Godé Bola Bosongo, Théophile Mboma Makwa, Danny Lulendo Kampanga, Dady Lulendu, Patrick Ngakinono Mayala, Héritier Diniamé Diabokwa, Halafu Mutolo, Lucien Mbula Nkongolo, Coco Mazo Aguabi, Christian Mbuyi, Norra Makaka Mubelo, Patrick Makaya Mukasi, Jean Paul Ngalamulume, Patrick Kondjo Onotamba, Jérémie Amanakou, Nénette Mashingo Muswamba, Léonard Ndamba Nzalalemba et Joël Ntombi Mwen.

Un remerciement particulier et sincère à Thérèse Bokungu, Ken Amisi, Janson Bauma, Crédo Ndoko, Adeline Totokani Maluma, Esther Gongo, Alex Gédéon Matondo, Bibi Batuna Tantia, Gédéon Basama Ngituka, Kadidia Monkamvula Ulere, David et Jérémie Nzembe. Je ne peux trouver des mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères et des amis (es) sur qui je peux compter.

Je me dois aussi de remercier les familles Osiong, Buetusa, Nzembe, Pindi et Kambila qui m'ont soutenu et qui ont bien voulu collaborer de diverses manières pour la finalisation de cette thèse. Je n'oublie pas mes cousins Adrien Nzungalese Ntil, Bastin Ifulu et Santry Yandimosi qui ont apporté leur pierre à l'édifice.

Et bien sûr, merci à mon père Alidor Milau Ankiel et à ma mère Micheline Asele Ansum qui ont toujours été présents et qui par l'éducation qu'ils m'ont donnée, m'ont permis d'arriver jusque là. Aucun mot ne saurait être assez éloquent pour exprimer ce que vous méritez pour

tous les sacrifices que vous n'avez cessés de consentir depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Enfin, cette thèse n'aurait jamais pu aller à son terme sans l'apport de mes frères Fanfan, Reagan, Abel, Peggy, Michel et ma sœur Ruth Milau à mes côtés. En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Je vous remercie pour votre affection sans égale et votre soutien si sincère.

## Résumé

La macrofaune du sol est régulièrement mise en avant pour son rôle sur les caractéristiques physiques et chimiques des sols cultivés. De plus, la fréquence de travail et l'intensité de l'exploitation culturale du sol sont des facteurs importants à prendre en compte dans la gestion de la parcelle agricole. Cette thèse vise à quantifier l'effet de l'occupation du sol par les communautés lombriciennes, ainsi que d'identifier les facteurs environnementaux qui gouvernent ces organismes. Parmi les facteurs potentiels, la diversité de la structure du biotope est de plus en plus évoquée, mais peu d'études appuient ces hypothèses. S'appuyant sur un important échantillon de vers de terre, l'étude a permis d'analyser simultanément la diversité lombricienne et l'effet de différents facteurs régulateurs dans les différentes occupations du sol de Bombo-lumene. Une diversité lombricienne variable a été observée en fonction du biotope, du régime alimentaire, du type de prostomium et de la distribution géographique. Dix espèces de vers de terre ont été mises en évidence dont 8 sont endémiques et 2 cosmopolites. La diversité de ces vers est corrélée avec le type d'occupation du sol. Celui-ci a un effet très marqué et déterminant sur la densité des peuplements lombriciens. En plus des variables environnementales, la richesse taxonomique des lombriciens a pu être prédite avec fiabilité par le type d'occupation du sol. La forêt dense, la galerie forestière et le recrû forestier sont plus diversifiés que la savane arborescente, la savane herbeuse et le sol sous culture.

Par ailleurs, la décomposition du bois revêt une importance primordiale sur l'évolution des caractéristiques des sols, notamment pour la valorisation des agrosystèmes à vocation agricole et/ou forestière. Les vers de terre remplissent un rôle important dans la transformation des matières organiques édaphiques, des éléments nutritifs, la répartition des flux d'énergie dans les écosystèmes terrestres et l'augmentation de la fertilité des sols. Les résultats de cette étude mettent en exergue 3 taxa décomposeurs du bois : *Dichogaster austeni*, *D. wenkei* et *D. tenuiseta*. L'analyse conjointe des sols et des turricules des vers de terre laissent entrevoir des teneurs significativement importantes en carbone et azote. Le rôle de cette macrofaune est discuté dans le cadre de la restauration des écosystèmes dégradés par la mobilisation de la matière organique du sol et l'amélioration des conditions de fertilité des sols sous le climat tropical.

En outre, le type d'occupation du sol influence significativement les structures écologiques des communautés lombriciennes. Les abondances et les densités sont corrélées positivement au gradient de végétation. La forêt dense semi décidue paraît mieux adaptée et plus favorable au développement de ces communautés. Les biomasses décroissent suivant un gradient d'intensification des activités anthropiques. Les espèces endogées sont indéfectiblement mieux adaptées aux différents biotopes que les espèces épigées et anéciques. De ce fait, elles constituent une composante importante des catégories écologiques des lombriciens. En revanche, les espèces anéciques sont mieux représentées dans le sol sous culture, ce qui traduit leur adaptation particulière au milieu perturbé.

**Mots clés :** diversité, lombricien, biotope, Bombo-lumene, Batékés

## **Abstract**

Soil macrofauna is regularly put forward for his role on the physical and chemical characteristics of cultivated land. In addition, the working frequency and intensity of cropping land use are important to consider in the management of agricultural land factors. This thesis aims to quantify the effect of land cover on earthworm communities, and to identify environmental factors that govern these organizations. Among the potential factors, the diversity of the structure of the habitat is increasingly discussed, but few studies support these hypotheses. Based on a large sampling of earthworms, the study to investigate the earthworm diversity and simultaneously the effect of different regulatory factors in different land of Bombo-Lumene was performed. A strong earthworm habitat diversity was found to be based on crop, diet, type of prostomium and geographical distribution. Ten species of earthworms have been identified including 8 endemic and 2 cosmopolitan ones. The diversity of these lines was correlated with the type of land use. It has a very strong and decisive effect on stand density earthworms. In addition to environmental variables, taxonomic richness of earthworms can be reliably predicted by the type of land use. The dense forest, gallery forest and forest regrowth are more diverse than the tree savannah, grassland and land under cultivation.



Furthermore, the decomposition of wood is of first importance on the development of soil characteristics, including the enhancement of forest and/or agricultural issues. Earthworms play an important role in the transformation of soil organic matter, nutrients, distribution of energy flow in terrestrial ecosystems and increasing soil fertility. Three taxa decomposers of wood, namely *Dichogaster austeni*, *D. wenkei* and *D. tenuiseta* were identified. The joint analysis of soil and earthworm casts suggested significantly larger carbon and nitrogen soil contents. The role of the macrofauna was discussed in the context of the restoration of degraded areas by the mobilization of organic matter in the soil ecosystems and the improvement of soil fertility in the tropical climate.

In addition, the type of land use significantly influence the ecological structure of earthworm populations. Abundances and densities of earthworms were positively correlated to the gradient of vegetation. The semi-deciduous rain forest seems more suitable and conducive to the development of these stands. Earthworm biomass decreased following a intensification gradient of anthropogenic activities. Soil-dwelling species are unfailingly better suited to different habitats and that epigaeic anecic species. Therefore, they are an important component of ecological categories of earthworms. In contrast, anecic species are better represented in the soil under cultivation, which reflects their particular adaptation to the environment disturbed.

**Key words:** diversity, lombrician, biotope, Bombo-lumene, Batékés

# Sommaire

Dédicace .....	ii
Remerciements .....	iii
Résumé .....	vi
Abstract .....	vii
Sommaire .....	ix
Liste des figures .....	xi
Liste des tableaux .....	xiii
Liste d'équations .....	xiii
Liste des annexes.....	xiii
Introduction .....	1
1. Problématique.....	1
2. Objectifs et Hypothèses.....	2
3. Structure de la thèse .....	3
Chapitre 1. Synthèse bibliographique : Etat des connaissances sur de vers de terre .....	4
1.1. Position taxonomique .....	4
1.2. Morphologie .....	4
1.3. Anatomie .....	5
1.4. Ecologie.....	7
1.5. Fonction et services écosystémiques .....	9
1.5.1. La construction de galeries.....	10
1.5.2. Bioturbation et évolution de la matière organique .....	10
1.5.3. Interaction avec d'autres organismes .....	12
1.6. Facteurs de contrôle des communautés lombriciennes .....	13
1.6.1. Facteurs biogéographiques .....	13
1.6.2. Température et humidité du sol.....	13
1.6.3 Matière organique .....	14
1.6.4. Le pH et le type de sol.....	14
1.7. Evaluation de la diversité des vers de terre .....	15
1.7.1. Vers de terre: « espèce », « diversité » et taxinomie.....	15
1.8. Rôle de la macrofaune dans la dynamique de la matière organique .....	15
1.8.1. Dynamique et fonctionnement de la matière organique dans le sol.....	15
1.8.2. Classification fonctionnelle de la faune du sol.....	17

1.8.3. Matière organique, élément clé du fonctionnement des sols.....	18
1.8.4. Contribution de la macrofaune dans le fonctionnement du sol.....	21
1.8.5. Notion de productivité.....	22
Chapitre 2. Matériel et méthodes .....	26
2.1. Description du site d'étude.....	26
2.1.1. Introduction .....	26
2.1.2. Localisation et organisation administrative.....	26
2.1.3. Climat et sol .....	27
2.1.4. Hydrographie.....	29
2.1.5. Végétation .....	29
2.1.6. Ressources faunistiques.....	31
2.1.7. Atouts du Domaine.....	32
2.1.8. Problèmes de gestion du site .....	32
2.1.9. Sites d'échantillonnage .....	35
2.2. Méthodes de prélèvement.....	37
2.2.1. Méthodes d'extraction chimique des lombriciens dans le sol.....	37
2.2.2. Méthodes d'échantillonnage du sol, des turricules et de prélèvement des vers de terre dans les bois en décomposition.....	38
2.3. Méthodes de conservation.....	39
2.4. Méthodes d'identification .....	39
2.4.1. Méthodes d'identification de taxa lombriciens .....	39
2.4.2. Méthodes d'identification des catégories écologiques.....	39
2.5. Méthodes d'analyse des sols et des turricules.....	39
2.6. Méthodes d'analyse des données .....	40
2.6.1. Analyse statistique.....	40
2.6.2. Utilisation des descripteurs écologiques .....	42
2.6.3. Logiciels utilisés.....	43
Chapitre 3. Résultats .....	44
3.1. Inventaire et diversité taxonomique des communautés lombriciennes.....	44
3.1.1. Richesse taxonomique et distribution des taxa.....	44
3.1.2. Caractérisation des communautés .....	48
3.1.3. Discussion .....	54
3.1.4. Conclusions .....	56
3.2. Impact des facteurs environnementaux sur la structure des communautés lombriciennes .....	57

3.2.1. Caractérisation des communautés .....	57
3.2.2. Discussion .....	64
3.2.3. Conclusions .....	68
3.3. Relation entre les activités lombriciennes et les processus associés à la restauration des sols.....	69
3.3.1. Caractérisation des vers de terre décomposeurs du bois .....	69
3.3.2. Evaluation des effets des activités des vers de terre sur l'enrichissement des sols.....	72
3.3.3. Discussion .....	77
3.3.4. Implication de la diversité des lombriciens à la gestion des agrosystèmes.....	81
3.3.5. Conclusions .....	82
3.4. Discussions générales.....	83
1.4.1. Biodiversité des communautés des communautés lombriciennes.....	83
1.4.2. Relation entre la structure écologique des lombriciens et les variables environnementales.....	84
1.4.3. Relation entre les activités des lombriciens et les processus associés à la restauration des sols .....	85
Conclusions générales .....	87
1. Synthèse des résultats.....	87
2. Perspectives .....	89
Références bibliographiques .....	90
Annexes .....	103

## Liste des figures

Figure 1. Morphologie d'un ver de terre .....	5
Figure 2. Anatomie interne d'un ver de terre .....	6
Figure 3. Modèle hiérarchique des facteurs contrôlant les processus de décomposition de la MO au sein des écosystèmes terrestres. ....	20
Figure 4. Schéma explicatif des rôles des décomposeurs et des ingénieurs de l'écosystème dans le sol .....	22
Figure 5. Diagramme ombrothermique (station de Bombo-lumene) de 2000 à 2012 .....	28
Figure 6. Vue d'une galerie forestière.....	32
Figure 7. Vue d'un feu de brousse sauvage .....	35
Figure 8. Présentation cartographique des biotopes échantillonnés.....	36
Figure 9. Ver de terre ( <i>Dichogaster tenuiseta</i> ) extrait par la méthode chimique .....	37

Figure 10. Dispositif d'échantillonnage des lombriciens et des sols .....	38
Figure 11. Variabilité de la densité lombricienne mesurée dans les biotopes.....	48
Figure 12. Indices de diversité mesurés dans les différents biotopes.....	49
Figure 13. Projection de la corrélation entre les taxa lombriciens et les biotopes dans l'espace défini par les deux axes factoriels .....	52
Figure 14. Projection de la corrélation entre les taxa lombriciens et les variables dans l'espace défini par les deux axes canoniques .....	53
Figure 15. Variabilité de la densité lombricienne mesurée dans les biotopes .....	57
Figure 16. Evolution de la densité des différentes catégories écologiques des lombriciens mesurée dans les biotopes .....	58
Figure 17. Indices de diversité des lombriciens mesurés dans les différents biotopes .....	59
Figure 18. Projection de la corrélation entre les taxa lombriciens et les biotopes dans l'espace défini par les deux axes factoriels .....	62
Figure 19. Projection de la corrélation entre les catégories écologiques des lombriciens et les variables dans l'espace défini par les deux axes canoniques .....	63
Figure 20. Variabilité de la densité des vers décomposeurs mesurée dans les biotopes .....	69
Figure 21. Indices de diversité des vers décomposeurs mesurés dans les différents biotopes .	70
Figure 22. Indices de diversité des vers décomposeurs mesurés dans les différentes espèces végétales .....	71
Figure 23. Abondances des vers décomposeurs mesurées dans les différentes espèces végétales .....	71
Figure 24. Concentration en carbone dans les sols et dans les turricules pour les différents biotopes .....	73
Figure 25. Concentration en azote dans les sols et dans les turricules pour les différents biotopes .....	74
Figure 26. Concentration en cuivre dans les sols et dans les turricules pour les différents biotopes .....	75
Figure 27. Concentration en magnésium dans les sols et dans les turricules pour les différents biotopes .....	76
Figure 28. Concentration en zinc dans les sols pour les différents biotopes.....	77

## Liste des tableaux

Tableau 1. Classification fonctionnelle de la faune du sol.....	17
Tableau 2. Synthèse des données climatiques (2000 à 2012) de la station de Bombo-lumene	28
Tableau 3. Caractéristiques générales des sites étudiés .....	36
Tableau 4. Composition de la richesse taxonomique des différents biotopes.....	44
Tableau 5. Présentation des taxa inféodés, sensibles et ubiquistes aux différents biotopes.....	45
Tableau 6. Matrice de similarité (indice de Jaccard) appliquée aux taxons non rares entre les biotopes .....	50
Tableau 7. Matrice des données standardisées des densités relatives des taxa .....	51
Tableau 8. Contributions des variables dans la définition des axes factoriels .....	51
Tableau 9. Contributions des variables dans la définition des axes canoniques .....	53
Tableau 10. Matrice des coefficients de corrélation de Bravais Pearson entre les différentes catégories écologiques des lombriciens . .....	60
Tableau 11. Matrice des coefficients de corrélation de Bravais Pearson entre les différents biotopes. ....	60
Tableau 12. Matrice des données standardisées des densités relatives des catégories écologiques.....	61
Tableau 13. Contributions des variables dans la définition des axes factoriels .....	62
Tableau 14. Contributions des variables dans la définition des axes canoniques .....	63

## Liste des équations

Équation 1. Indice de similarité de Jaccard .....	42
Équation 2. Indice de diversité de Shannon .....	42
Équation 3. Indice d'équitabilité de Pielou.....	42
Équation 4. Indice de diversité de Shannon (maximal).....	43

## Liste des annexes

Annexe 1. Quelques définitions utiles.....	103
Annexe 2. Extrait des clés d'identification des espèces de vers de terre .....	106
Annexe 3. Quelques photos prises sur le terrain .....	107
Annexe 4. Faune de la Réserve et Domaine de Chasse de Bombo-lumene.....	108

# Introduction

## 1. Problématique

Les sols des régions tropicales sont particulièrement fragiles et pauvres (Sys *et al.*, 1961). L'altération de la roche a été intense et n'a laissé que des argiles inertes (kaolinite), dépourvus de nutriments minéraux et de très faible capacité d'échange cationique (C.E.C) (Koy, 2010). Les réserves de nutriments sont uniquement accumulées dans la biomasse végétale et libérées seulement lors de la minéralisation de la matière organique. Ces nutriments sont aussitôt réabsorbés par les racines des végétaux. Les forêts tropicales, en tant qu'écosystèmes écologiques forestiers, sont les plus grands réservoirs de la diversité biologique (Fittkan, 1997). La conséquence la plus grave de la fragmentation de l'écosystème forêt est à ce jour la diminution de la diversité biologique.

Cependant, la République Démocratique du Congo (RDC) connaît un rythme de déforestation évalué à 0,20 %, le taux annuel le plus élevé de tous les pays du bassin du Congo. La biodiversité est dans ce cas soumise à de fortes perturbations écologiques d'origines diverses : cultures sur brûlis, surexploitation des ressources naturelles due aux flux migratoires consécutifs aux conflits armés récurrents, taux d'accroissement démographique élevé. En conséquence, le pays continue à connaître une forte dégradation de la biodiversité et du couvert végétal qui se traduit entre autre par l'érosion du sol (Nuutinen, 1998 ; Naeem *et al.*, 2002). Ces phénomènes entraînent des conséquences non seulement sur la fertilité mais aussi sur l'écologie tant de la faune terrestre que de la pédofaune.

Toutefois, au sein des écosystèmes terrestres, le sol est sans doute l'un des compartiments biologiques les plus riches en espèces et aussi l'un des plus vulnérables notamment à l'érosion (Wolters, 2001). La connaissance de la transformation des forêts, de la diversité de la faune du sol et du rôle de ses organismes dans le fonctionnement des écosystèmes requiert donc une grande importance pour la gestion et la conservation de la biodiversité et des écosystèmes qui les abritent.

Parmi les acteurs biologiques indispensables à la fertilité des sols, les vers de terre sont reconnus comme étant les véritables ingénieurs du sol (Lavelle *et al.*, 1997). Darwin (1881) soulignait déjà leur rôle fondamental dans la formation de la « terre végétale ». Lavelle (1997)

estime qu'environ 400 tonnes de terre par hectare et par an, passent dans le tractus digestif des vers de terre dans des conditions optimales. Graham *et al.* (1995), dans une séquence de 41 ans, rapportent un développement de l'horizon organo-minéral de 7 cm en présence de vers contre seulement 1 cm en leur absence.

En RDC, peu de résultats ont été obtenus lors des précédentes études concernant les communautés de vers de terre (Lessedjina, 1970). Les travaux relatifs à la biodiversité des lombriciens restent encore insuffisants, car d'une part, l'identification et la classification de ces organismes demeurent difficiles par manque de taxonomistes qualifiés, et d'autre part, l'étude des vers de terre n'est pas évidente à réaliser en raison de plusieurs contraintes liées à la nature des sols et à la complexité de ces organismes (Decaëns, 2010). Par exemple, aucune étude n'a combiné à ce jour, la diversité des communautés de vers de terre et les changements d'occupation et d'utilisation des sols intervenant dans les différents biotopes. Tran vinh An (1973) a montré que les turricules rejetés par les vers ont été considérés comme un facteur d'entretien du sol.

L'influence d'un certain nombre de facteurs environnementaux reste également mal connue, en particulier, il n'a jamais été vérifié dans quelle mesure la structure du paysage et le type de sol influent la diversité des communautés lombriciennes. Peu d'études prennent en compte simultanément la diversité des vers de terre et leurs interactions dans des contraintes édaphoclimatiques variées. Ainsi, il serait judicieux de s'intéresser à la biodiversité des lombriciens en tenant compte des conditions édaphoclimatiques. Cette thèse présente donc l'originalité d'apporter des données de la distribution spatiale des lombriciens liée à la variabilité des conditions édaphoclimatiques dans la Réserve et Domaine de chasse de Bombo-lumene au plateau des Batékés.

## **2. Objectifs et Hypothèses**

La présente thèse se donne pour objectif d'évaluer les effets de l'occupation du sol sur la diversité taxonomique, la structure des communautés lombriciennes du sol et les processus fonctionnels associés notamment la décomposition de la matière organique. Plus spécifiquement, elle cherche à :



- inventorer les espèces lombriciennes dans les différents biotopes ;
- évaluer la biodiversité des communautés lombriciennes présentes dans chaque biotope ;
- identifier et déterminer les effets des variables édaphoclimatiques sur la structure écologique des vers de terre ;
- identifier les espèces lombriciennes décomposeurs du bois et évaluer leur rôle dans la dynamique de la décomposition de la matière organique.

De ces principaux objectifs, trois axes de recherche ont été développés et se déclinent à travers les hypothèses suivantes :

- cette aire protégée très diversifiée sur le plan microclimat, sol et végétation, peut révéler une grande diversité lombricienne avec des espèces très adaptées dans les différents biotopes ;
- les changements des conditions édaphoclimatiques induisent des modifications sur la densité, la composition, la richesse spécifique et la diversité au sein des populations des vers de terre et sur leur structure communautaire ;
- les activités lombriciennes ont des effets positifs sur l'amélioration des processus fonctionnels associés (décomposition de la matière organique).

### **3. Structure de la thèse**

Outre l'introduction, cette thèse est structurée en trois chapitres :

- le premier chapitre synthétise les connaissances sur les vers de terre et la complexité de leurs activités dans la dynamique de la décomposition de la matière organique ;
- le deuxième chapitre décrit le matériel et méthodes. Il présente le site d'étude, replace l'étude dans le contexte des enjeux liés à la gestion de cette Réserve et Domaine de chasse et détaille les méthodes scientifiques appliquées à l'étude;
- le troisième chapitre détaille les résultats de l'inventaire et diversité taxonomique des communautés lombriciennes, des effets des facteurs environnementaux sur leur structure et de la relation entre leurs activités et les processus associés à la restauration des sols.

Enfin, une conclusion générale s'attache à brosser succinctement les acquis des résultats et ouvre des perspectives.

## **Chapitre 1. Synthèse bibliographique : Etat des connaissances sur de vers de terre**

Les vers de terre, aussi appelés « lombriciens » représentent une composante majeure de la macrofaune du sol dans la plupart des écosystèmes terrestres. En 1994, plus de 3600 espèces de vers de terre, réparties en 15 familles, avaient été recensées dans le monde, auxquelles s'ajoutent plus de 60 nouvelles espèces chaque année. Ils jouent un rôle important dans leur environnement grâce aux différents mécanismes physico-chimiques et biologiques, permettant d'améliorer la fertilité et de préserver la structure du sol (Razafindrakoto, 2013).

### **1.1. Position taxonomique**

Les vers de terre appartiennent à l'embranchement des Annélides, à la classe des Clitellata et à l'ordre des Haplotaxida. Ils se répartissent en différentes familles suivant des caractéristiques spécifiques.

Règne	: Animal
Embranchement	: Annélide
Classe	: Clitellata
Sous-classe	: Oligochaeta
Ordre	: Haplotaxida
Sous-ordre	: Lumbricina
Famille	: Eudrilidae, Acantodrilidae, Lombicidae, etc.

### **1.2. Morphologie**

Les vers de terre sont des Annélides fousseurs, dont le corps très extensible est constitué par plusieurs segments. Selon les espèces, la longueur du corps varie de quelques millimètres à 3 mètres (Figure 1). Chaque segment peut être garni soit de quatre paires de courtes soies sur la face ventrale soit d'une rangée de soies tout autour (chez certaines espèces tropicales). Ces soies interviendraient dans le déplacement. Les deux premiers segments (le prostomium et le péristomium) ne portent pas de soies. Il en est de même du dernier segment ou pygidium. Ce dernier n'a pas de soies et a un rôle particulier : pointe sensorielle pour le premier, bouche pour le deuxième et anus pour le dernier (Razafindrakoto, 2012). La couleur du corps varie le plus souvent du rose au marron et peut être parfois irisée avec des reflets violets. Quelques

espèces sont très colorées, orange ou turquoise (James, 1991). La présence, chez les adultes, d'un bourrelet tégumentaire, le clitellum, qui apparaît à la maturité génitale est un caractère frappant de l'anatomie externe.

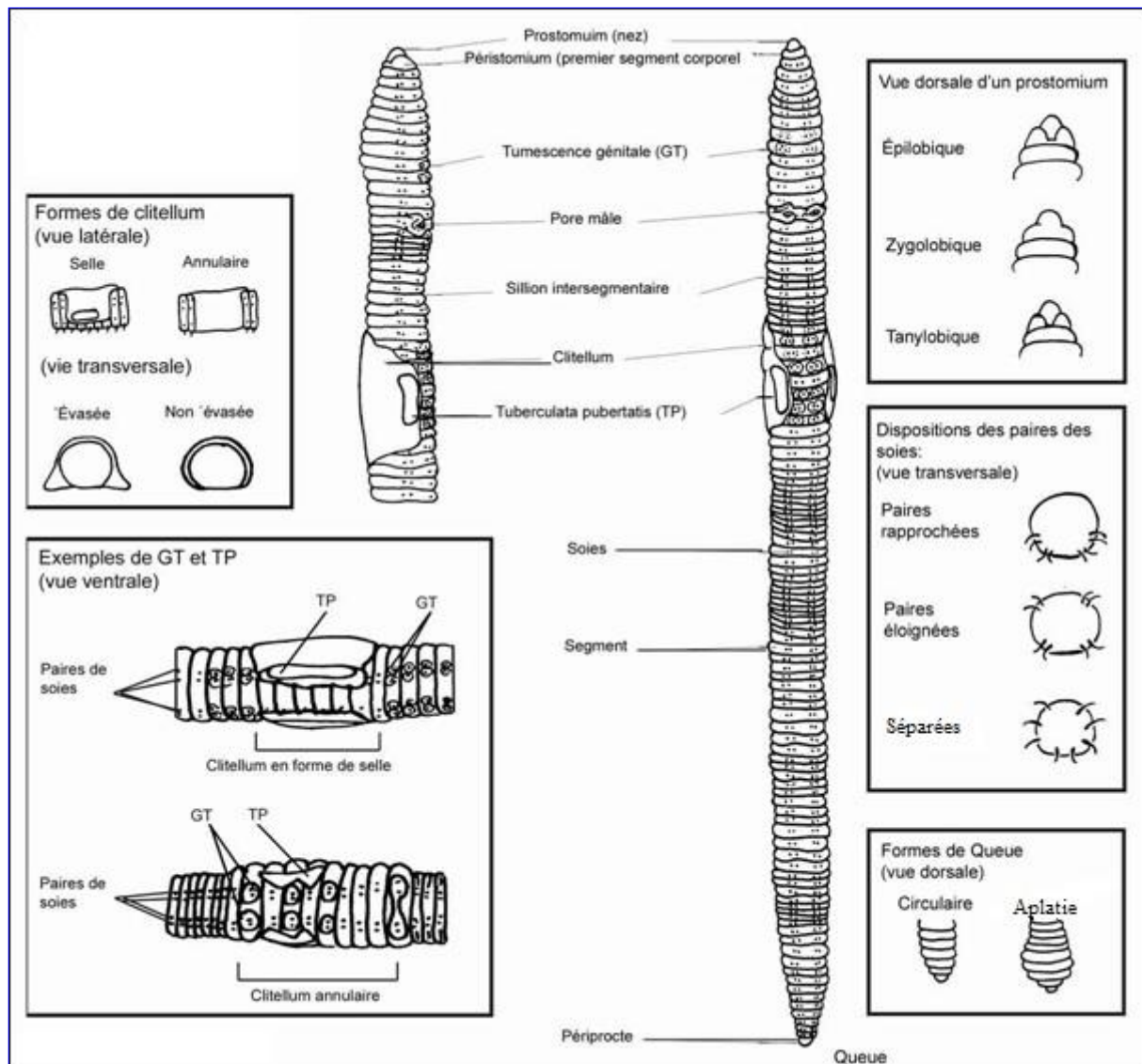
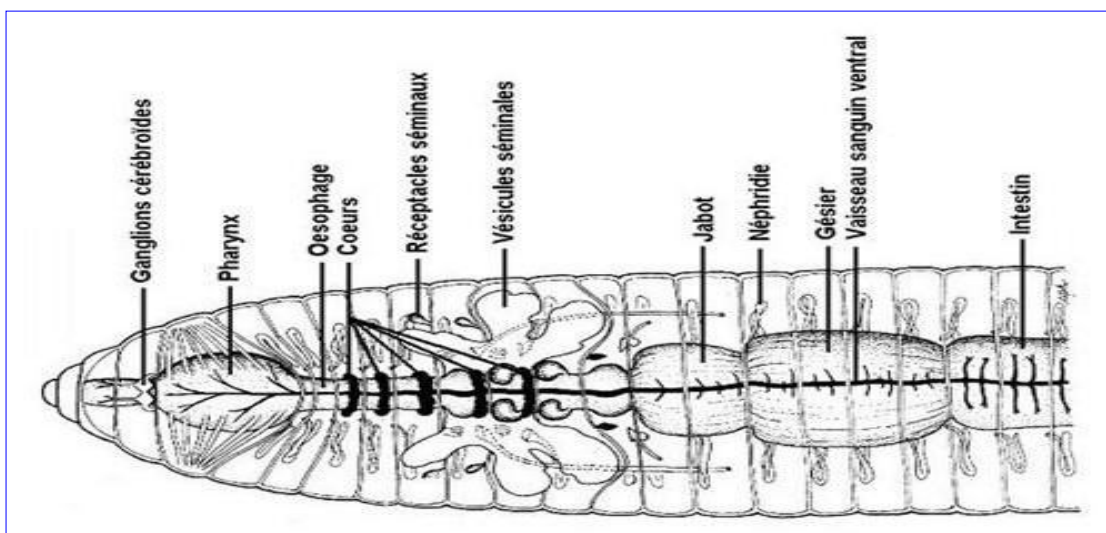


Figure 1. Morphologie d'un ver de terre (Copyright web. <http://www.futura-science.com>)

### 1.3. Anatomie

Les vers de terre sont des coelomates triploblastiques protostomiens. Il y a existence de cavités coelomiques métamérisées. Ces cavités sont homonomes, c'est-à-dire régulières avec répétition des néphridies et des ganglions. Le corps métamérisé est constitué d'anneaux successifs nommés segments. Ceux-ci sont entourés d'une musculature longitudinale et d'une musculature cylindrique. Le système nerveux est formé par une chaîne nerveuse ventrale (hyponeurien). Les vers de terre présentent un système circulatoire fermé. Il comprend un gros vaisseau dorsal contractile où le sang est propulsé vers l'avant. Cinq à sept paires de cœurs latéraux reprennent le sang et l'envoient vers l'arrière dans un vaisseau ventral. Le tube digestif est assez élaboré (Figure 2) et comprend une bouche, un pharynx qui peut servir de ventouse pour tirer les aliments dans les galeries et de broyeur pour les triturer. Les aliments passent ensuite dans le jabot, reçoivent un apport de carbonate de calcium par les glandes de Morren (ou glandes calcifères), passent dans le gésier qui continue le broyage et atteignent enfin l'intestin. Du fait d'une respiration cutanée, les vers de terre ne possèdent pas de poumons, le corps doit rester humide pour permettre la respiration. Ils sont hermaphrodites, on trouve chez un même individu des caractères mâles et des caractères femelles. En revanche, la reproduction se fait toujours entre deux individus, rare est le cas où il existe une fertilisation directe de l'œuf ou Amphimixie (James, 1991).



*Figure 2. Anatomie interne d'un ver de terre (Copyright web. <http://www.futura-science.com>)*

## 1.4. Ecologie

Une approche fonctionnelle visant à regrouper des espèces a été entreprise par plusieurs auteurs aboutissant à une classification écologique des espèces en fonction de différents paramètres. Parmi ces travaux, ceux de Bouché (1972 et 1977) et de Lavelle (1981) appliqués aux Lumbricidae regroupent les espèces en s'appuyant sur des critères morphologiques, physiologiques et écologiques (répartition selon la profondeur du sol, l'alimentation, la pression des prédateurs, la mobilité superficielle, la taille, la longévité et la résistance à la sécheresse) et aboutissent à la définition de 3 catégories écologiques : épigée, endogée, anécique. La description de ces 3 catégories a par la suite été complétée, notamment en ce qui concerne les endogés par Bouché (1977) et Lavelle (1981), en se basant respectivement sur le mode alimentaire et la localisation des individus et sur la qualité de matière organique (MO) ingérée par les lombriciens, définissant trois sous classes parmi les endogés.

En s'appuyant sur les travaux de Bouché (1972, 1977) et Lavelle (1981) appliqués aux Lumbricidae, ceux de Lee (1959) appliqués aux Megascolidae, en intégrant la classification développée par Satchell (1980) basée sur les stratégies biodémographiques "r" et "k" proposées par Mac Arthur et Wilson (1967) et en tenant compte des résultats de travaux portant sur la description des réseaux de galeries (Kretzschmar & Aries, 1990 ; Lee & Foster, 1991 ; Lavelle, 1997), les 3 catégories écologiques peuvent être caractérisées comme suit :

- Epigés (Bouché, 1977) ou "litter species" (Lee, 1959) : individus de petite taille (10 à 30 mm de long en général et présentant un diamètre de l'ordre de 1 à 2,5 mm) se situant en surface, dans des milieux riches en matière organique : au niveau de la litière (straminicoles), sous les écorces de tronc en décomposition (corticoles) ou dans certains composts et fumiers en relation avec les activités humaines (détritiphages et coprophages). Ils peuvent aussi se situer dans les galeries d'autres vers de terre, dans les terriers d'animaux ou les fissures du sol (pholéophiles), mais ces espèces ne creusent que peu ou pas de galerie. Ils ingèrent très peu de matière minérale, se nourrissant presque exclusivement de matière organique. Peu protégés par leur habitat, ils sont soumis aux aléas climatiques : ne bénéficiant pas de l'effet tampon du sol, ils subissent la dessiccation qu'ils compensent par leur lubrification. Ils ne survivent aux conditions climatiques drastiques que sous la forme de cocons alors que les adultes disparaissent. Ils sont aussi soumis à la prédation. Ces différentes contraintes ont entraîné (i) le développement d'une stratégie biodémographique de type r (Satchell,

1980) caractérisée par une capacité de reproduction très élevée et une croissance rapide compensant une faible longévité, (ii) une mobilité importante et (iii) une homochromie avec l'environnement (le plus souvent rouge brun et parfois vert).

- Endogés : individus de taille petite à moyenne (de 1 à 20 cm de long, présentant un diamètre moyen de l'ordre de 2 à 4,5 mm), de pigmentation claire, voire apigmentés, et vivant continuellement dans le sol. Ces individus entretiennent un réseau de galeries sub-horizontale à horizontale, très ramifié et de type temporaire, cet aspect temporaire étant lié aux déjections déposées dans leur galerie. Ils puisent leur alimentation soit des racines mortes, soit des matières organiques plus ou moins évoluées et intégrées à la matière minérale.

Bouché (1977) subdivise cette catégorie en sous-catégories en fonction de leur mode alimentaire et de leur localisation dans le sol : - les épi-endogés : vivent dans l'horizon organo-minéral A, mais peuvent descendre jusque 70 cm de profondeur. Cette sous-catégorie inclue les sapro-rhizophages qui sont essentiellement localisés près des racines et peuvent se nourrir de racines mortes. Lee (1959) associe cette sous-catégorie aux anéciques ("top soil species") - les géophages : s'alimentent essentiellement de sol minéral contenant divers éléments organiques - les hypo-endogés : vivent en profondeur dans les horizons pauvres en matière organique. Ils correspondent aux "subsoil" définis par Lee (1959)

Lavelle (1981) subdivise cette catégorie en fonction de la nature de la matière organique ingérée, de son degré d'évolution et de la localisation dans le profil :

- les polyhumiques : les plus communs dans les sols tempérés, vivent dans les premiers centimètres du sol correspondant à l'horizon organo-minéral, riche en matière organique,
- les oligohumiques : géophages, ingérant une matière minérale peu riche en matière organique et de plus difficilement assimilable.
- les mésohumiques : vivant dans des milieux intermédiaires.

Toujours à l'abri du sol, les endogés sont soumis à une faible prédation et à de faibles variations climatiques ; tout comme les anéciques, les endogés présentent un faible effort de reproduction et une plus grande longévité : la majeure partie de leur budget énergétique est investi dans la croissance et le maintien de l'individu (stratégie biodémographique de type K,

Satchel 1980). Ces espèces résistent aux conditions climatiques drastiques grâce à une mise en quiescence.

- Anéciques (Bouché 1977) ou "top soil species" (Lee, 1959) : individus de taille moyenne à géante (de 10 à 110 cm de long chez les Lumbricidae adultes, présentant un diamètre de l'ordre de 4 à 8 mm) et de pigmentation foncée avec un gradient de décoloration antéro-postérieur, ce qui leur assure une protection vis à vis de la prédation. Ces individus fouisseurs, explorent l'ensemble du profil de sol, en entretenant un réseau de galeries sub-vertical à vertical plus ou moins ramifié et pouvant atteindre une longueur de 5 à 6 mètres. Ces galeries de type permanent (c'est à dire utilisées de manière plus ou moins permanente), débouchent à la surface, créant ainsi une porosité à l'interface lithosphère-atmosphère. Ces individus, se nourrissant de feuilles et autres débris végétaux, prennent leur nourriture principalement à la surface du sol (mais aussi dans une moindre mesure dans le sol). Via leur système digestif, ils assurent un brassage intime de la matière minérale et de la matière organique, rejetant de nombreuses fèces à la surface du sol (turricules) et dans une moindre mesure dans le sol. Par la construction de galeries et le brassage de matières minérales et organiques, ils participent activement à la pédogenèse du sol. Moins soumis aux contraintes que les épigés, surtout par leur localisation dans le sol, ils présentent un faible effort de reproduction et une plus grande longévité : la majeure partie de leur budget énergétique est investi dans la croissance et le maintien de l'individu (stratégie biodémographique de type K, Satchell 1980). Ils survivent aux conditions climatiques drastiques grâce à un rythme biologique réglé par une diapause vraie ou une quiescence.

## **1.5. Fonction et services écosystémiques**

Le terme de « fonction » est ici utilisé dans le sens « d'utilité » ; il désigne les rôles que jouent les vers de terre dans l'agrosystème. Les services écosystémiques désignent les bénéfices que la société tire du fonctionnement des écosystèmes (Millenium Ecosystem Assessment, 2005) et plus précisément ici, les bénéfices tirés de la présence de lombriciens dans les écosystèmes cultivés. Les vers de terre ont été promus au grade d' « ingénieurs de l'écosystème », au sens décrit par Jones *et al.*, (1994) : ils modifient directement ou indirectement la disponibilité des ressources pour d'autres organismes de la biocénose. Ils ont un rôle important au sein des

agrosystèmes car ils participent à la dynamique physique, chimique et biologique du sol, à travers la construction de galeries, l'alimentation et les rejets ainsi que la formation de middens.

### **1.5.1. La construction de galeries**

La construction de galeries peut être une réponse des vers de terre à différentes contraintes telles que la teneur en nourriture et en eau, la température ou le degré d'oxygénation (Jégou *et al.*, 2000). Les galeries des vers de terre augmentent la macroporosité du sol et, par conséquent, contribuent à son aération (Lavelle, 1997) et à l'infiltration de l'eau. Elles facilitent aussi la pénétration des racines ainsi que les mouvements des invertébrés (Jégou *et al.*, 2002). Une meilleure infiltration de l'eau peut minimiser le ruissellement, l'érosion et le transport d'éléments dissous dans l'eau de surface, ce qui réduit les risques de pollution des sols. Mais, à l'inverse, les galeries de vers de terre peuvent accélérer le transfert en profondeur des produits phytosanitaires vers les nappes phréatiques. Ce transfert rapide, qui s'opère par écoulement turbulent dans les galeries d'anéciques, ne laisse pas le temps aux microorganismes d'agir pour détoxifier ou dégrader un certain nombre de produits. Par ailleurs, en creusant leurs galeries, les vers de terre mélangent les horizons du sol et enfouissent les résidus des cultures. Ce phénomène de bioturbation joue un rôle important dans la fragmentation et la minéralisation de la matière organique du sol d'oxygénation (Jégou *et al.*, 2000). Cluzeau *et al.* (1987) ont montré que la diminution des activités lombriciennes dans le sol pouvait entraîner une forte perturbation du recyclage de la matière organique.

### **1.5.2. Bioturbation et évolution de la matière organique**

#### **1.5.2.1. L'alimentation et les rejets**

Les vers de terre sont omnivores car, s'ils se nourrissent principalement des fragments de matériel végétal plus ou moins dégradés et incorporés dans le sol, ils ingèrent également des microorganismes vivants, des champignons, de la micro- et de la mésofaune vivante ou morte. On distingue deux régimes alimentaires chez les vers de terre : d'une part, les détritivores, qui se nourrissent de litière végétale et de racines mortes situés à la surface ou dans les horizons de surface, riches en matières organiques : principalement des anéciques et des épigés, et d'autre part, les vers de terre géophages qui ingèrent de grandes quantités de sol au niveau des



horizons plus profonds. Ce sont essentiellement des endogés (Edwards & Bohlen, 1996 ; Sims & Gerard, 1999).

La production journalière de rejets varie fortement entre espèces. En régions tempérées, la quantité journalière de sol qui transite dans le tube digestif d'un ver varie entre 0.08 et 0.50 g de sol sec/g ver pour les anéciques et entre 0.07 et 0.80 g de sol sec/g ver pour les épigés. Les vers endogés tropicaux excrètent quant à eux entre 1 et 7 g/jour pour les adultes et jusqu'à 35 g/jour pour les juvéniles (Lavelle & Spain, 2001).

Les activités alimentaires et de rejet des vers de terre affectent différemment la matière organique du sol en fonction de l'échelle de temps considérée. Elles favorisent la minéralisation de la matière organique et participent à la formation de l'humus et à la stabilité structurale.

Les matières organiques (mortes ou vivantes) ingérées par les lombriciens sont dégradées et mélangées à la fraction minérale du sol durant le transit intestinal. Au cours de ce processus, dans lequel interviennent activement les microorganismes du tube digestif, les propriétés physiques et chimiques du sol sont modifiées. En excréant les matières ingérées, les vers de terre modifient alors localement le sol. Les rejets sont enrichis en nutriments utilisables par les microorganismes et les plantes. La biomasse et l'activité microbienne sont ainsi localement favorisées (Tiunov & Scheu, 1999) car les rejets sont généralement plus riches en azote, en phosphore et en matières organiques humifiées que le sol environnant. Ainsi, Cluzeau *et al.* (1994) ont montré qu'une augmentation de la biomasse lombricienne entraînait une augmentation de la biomasse microbienne. Celle-ci favorise à son tour la minéralisation de la matière organique et la libération de nutriments. Le processus est donc amplifié, ce qui explique l'importance du rôle des vers de terre en tant que régulateurs des cycles biogéochimiques dans les sols (Tiunov & Scheu, 1999 ; Eriksen-Hamel & Whalen, 2007).

On appelle turricules les rejets présents à la surface du sol et déjections ceux qui sont déposées sur les parois des galeries. La taille des turricules varie de quelques millimètres à quelques centimètres et dépend de celle des espèces (Darwin, 1881). La drilosphère est la fraction de la terre qui est passée par le tube digestif des vers de terre et qui constitue la paroi des galeries. L'épaisseur moyenne de la drilosphère est de 2 mm (Bouché, 1975). A long terme, l'activité des vers de terre induit la production de matières organiques stables, qui se

retrouvent physiquement protégée à l'intérieur des déjections. Les vers de terre participent ainsi à la séquestration du carbone (Gobat *et al.*, 2003).

#### 1.5.2.2. La création de middens

Certaines espèces comme de vers anéciques forment des amas au niveau de l'orifice de leur galerie, à la surface du sol. Ces structures, appelées middens (Hamilton & Sillman, 1989) sont constitués de débris organiques plus ou moins enfouis à l'entrée des galeries et mélangés avec des turricules déposés à la surface. Les conditions de température et d'humidité régnant au sein de ces petits monticules entraînent un développement des activités microbiennes qui utilisent le substrat des composés facilement assimilables contenus dans les déjections des lombriciens et les fragments organiques (Cluzeau *et al.*, 2005). Ces fragments organiques, partiellement dégradés, sont ensuite consommés par le ver occupant la galerie et progressivement enfouis au sein du profil.

#### 1.5.3. Interaction avec d'autres organismes

Les vers de terre ont également d'autres rôles, moins étudiés mais tout aussi importants, dont on commence seulement à prendre conscience. Ils participent à la libération de substances (vitamines, protéines) qui stimulent la croissance des plantes (Edwards & Bohlen, 1996). L'origine de ces substances, produites indirectement par les microorganismes associés au tube digestif des vers de terre ou à leurs structures (turricules, galeries), n'est pas encore complètement connue et il semble que cet effet soit spécifique aux espèces de plantes et de vers de terre étudiées (Cluzeau *et al.*, 2005). Par ailleurs, Scheu (2003) rapporte plusieurs études montrant un effet direct des populations de vers de terre sur la croissance, la composition des communautés de plantes ainsi que sur la susceptibilité des plantes aux herbivores. Cependant, il précise qu'il n'y a pas d'information suffisante pour renseigner les mécanismes impliqués. Les vers de terre peuvent également, en levant les dormances de certaines graines, permettre leur germination et contribuer à la dissémination des espèces végétales concernées. Par ailleurs, ils participent à la dispersion de propagules de mycorhizes et contribuent ainsi au bon fonctionnement de la rhizosphère. En outre, les vers de terre jouent donc un rôle central dans l'amélioration et le maintien de la productivité des agrosystèmes. Cependant, les parcelles cultivées constituent un biotope très perturbé (et très perturbant) pour ces organismes peu mobiles qui subissent directement ou indirectement les conséquences des modes de gestion des sols (Blanchart *et al.*, 1999).

## **1.6. Facteurs de contrôle des communautés lombriciennes**

### **1.6.1. Facteurs biogéographiques**

La présence de la faune du sol naturel est dépendante des contraintes externes ou filtres environnementaux (biogéographiques, dispersion, habitat) ainsi que des contraintes biotiques. Les contraintes externes correspondent aux facteurs environnementaux qui agissent comme des filtres à différentes échelles spatiales et temporelles. Ces filtres sélectionnent les espèces selon qu'ils possèdent ou non les traits requis (Hedde, 2006).

### **1.6.2. Température et humidité du sol**

Les vers de terre sont composés à 80-90 % d'eau lorsqu'ils sont pleinement hydratés (Lee, 1985) et, même s'ils peuvent supporter des pertes en eau, ils restent très sensibles aux faibles humidités. De même, étant poïkilothermes, ils ne régulent pas leur température corporelle et sont par conséquent très sensibles aux variations de température. Les conditions optimales de température se situent en général entre 10 et 20°C pour les espèces de régions tempérées et entre 20 et 30°C pour les zones tropicales. Peu d'espèces survivent à des températures inférieures à 0°C ou supérieures à 28°C (Lee, 1985 ; Curry, 1998).

Lorsque les conditions de température et d'humidité du sol deviennent défavorables (sécheresse, baisse ou hausse trop importante de la température), la survie, la fécondité et la croissance des lombriciens sont affectées (Lee, 1985). Différentes stratégies de survie sont utilisées par les vers de terre. Certains ne survivent aux mauvaises périodes que sous forme de cocons (Edwards *et al.*, 1995) et, plus généralement, des espèces épigées car, vivant en surface, elles sont les plus exposées aux aléas climatiques. D'autres espèces, principalement les anéciques, peuvent migrer vers les horizons profonds du sol où les conditions de température et/ou d'humidité leur sont moins défavorables (Edwards & Bohlen, 1996). Aussi, les plus gros juvéniles, les sub-adultes et les adultes migrent-ils pour s'affranchir partiellement des conditions extérieures alors que les plus petits juvéniles entrent en léthargie. Les vers de terre sont effectivement susceptibles de cesser leur activité pendant des périodes plus ou moins longues. Ce phénomène est appelé diapause, para-diapause ou quiescence en fonction du degré de léthargie du ver et des facteurs qui déclenchent et qui mettent fin à cette période d'inactivité.

La température et l'humidité du sol sont les facteurs clés qui régulent l'abondance et l'activité des vers en milieu naturel (Satchell, 1967 ; Sims & Gerard, 1999) et les populations lombriciennes répondent très rapidement à des variations de ces facteurs du milieu.

### **1.6.3 Matière organique**

Les populations lombriciennes se nourrissent de matière organique plus ou moins décomposée, à la surface ou dans le sol. Dans les parcelles agricoles, la quantité, la qualité et la localisation des matières organiques sont des facteurs importants pour les vers de terre et dépendent surtout, des plantes cultivées. Lofs-Holmin (1983) a rapporté que la qualité et la quantité des résidus de culture retournés dans le sol sont essentielles pour le développement et la croissance des vers de terre. L'effet négatif d'une diminution de la ressource trophique est souvent rapporté dans la bibliographie (Sims & Gerard, 1999).

Les études ont montré que les vers de terre ont des préférences alimentaires. Guild (1955) a trouvé que la plupart des vers de terre préféraient le fumier ou les herbes grasses et feuilles des arbres. Les aiguilles de pin étaient moins appréciées.

### **1.6.4. Le pH et le type de sol**

Les vers sont généralement absents des sols très acides ( $\text{pH} < 3.5$ ) et sont peu nombreux dans les sols à  $\text{pH} < 4.5$  (Curry, 1998). Il existe un pH optimal pour chaque espèce (Edwards & Bohlen, 1996). La majorité des espèces de régions tempérées se trouvent dans des sols à pH compris entre 5.0 et 7.4 (Satchell, 1967).

D'autres facteurs du milieu peuvent influencer la distribution et l'abondance des populations des vers comme le type de sol, la profondeur et la texture du sol (Philipson *et al.*, 1976 ; Bachelier, 1978 ; Edwards & Bohlen ; 1996). Par exemple, Nordström & Rundgren (1974) trouvent une corrélation positive significative entre l'abondance des vers de terre et le taux d'argile des sols.

## **1.7. Evaluation de la diversité des vers de terre**

### **1.7.1. Vers de terre: « espèce », « diversité » et taxinomie**

L'évaluation de la diversité repose le plus souvent sur l'identification d'individus au niveau de l'espèce. Or, plusieurs définitions de « l'espèce » existent. La définition la plus citée est celle du concept biologique de l'espèce énoncé par Mayr (1999) : « les espèces sont des groupes de populations naturelles, effectivement ou potentiellement interfécondes, qui sont génétiquement isolées d'autres groupes similaires ». L'espèce est la plus grande unité de population au sein de laquelle le flux génétique est possible dans des conditions naturelles. Elle est l'unité de base communément utilisée dans les analyses en biogéographie, écologie, biologie évolutive et en biologie de la conservation. Chez les vers de terre, environ 3700 espèces ont été décrites à ce jour, ce qui représente une proportion significative de 6000 espèces estimées pour la biodiversité totale de ce groupe (Decaëns *et al.*, 2013). Les vers de terre appartiennent ainsi à un groupe dont la taxinomie est incomplète et difficile à compléter et, ce, pour diverses raisons regroupées sous le terme « taxonomic impediment » (Decaëns *et al.*, 2006, 2008 ; Rougerie *et al.*, 2009). Par ailleurs cela tient au fait, entre autres, que les espèces manquantes, non décrites et non identifiées, se trouvent pour la plupart dans des zones tropicales. De plus, de récentes découvertes suggèrent que la taxinomie actuelle connue du groupe des vers de terre n'est pas si précise qu'on le pensait initialement.

A ce jour, la taxinomie morphologique traditionnelle se voit utilement complétée par des outils moléculaires dans le but d'évaluer efficacement la diversité taxinomique des vers de terre dans les sols tempérés et dans les sols tropicaux en particulier.

## **1.8. Rôle de la macrofaune dans la dynamique de la matière organique**

### **1.8.1. Dynamique et fonctionnement de la matière organique dans le sol**

La matière organique (MO) du sol est constituée des apports successifs de matières d'origine végétale et animale, à différents stades de décomposition (Kachaka *et al.*, 1993). Pour les écosystèmes terrestres, l'essentiel des apports de matière vient de la production de litière végétale et de la mortalité des organismes décomposeurs : la production de MO issue des animaux supérieurs représente entre 0,1 et 1,0 % de la production de litière végétale dans les

écosystèmes forestiers. Par litière, on entend tous les résidus organiques aériens (branches, feuilles, écorces, fruits lors de la mort de l'arbre, tronc) et souterrains (renouvellement rapide des racines et lors de la mort de l'arbre, l'ensemble du squelette racinaire) (Craswell & Lefroy, 2001).

Le carbone dans la matière végétale en décomposition est présent sous forme de tanins, phénols et carbohydrates différents dont on distingue plusieurs grands types : cellulose (polymère du glucose), hémicellulose (polymère d'autres sucres) et lignine (assemblage de composés phénoliques). Ces composés sont présents en proportions variables selon l'organe végétal considéré. Les feuilles contiennent plus de cellulose, les branches plus de lignine. Les celluloses des arbres enchevêtrées dans la lignine fait office de ciment et confère au bois sa rigidité. Parallèlement, l'azote est présent dans les cellules végétales sous forme de protéines, acides aminés et acides nucléiques. Ces matières végétales représentent une réserve d'énergie et d'éléments minéraux pour les organismes du sol, à la prédation desquels elles sont soumises par le biais de processus chimiques et biophysiques qui en font un ensemble complexe en perpétuelle évolution (Craswell & Lefroy, 2001).

Les temps de résidence de la MO, c'est à dire le temps qui s'écoule entre le moment où elle est incorporée dans le sol et le moment où elle est complètement transformée en éléments inorganiques, sont très variables, de l'ordre de quelques jours pour des racines, des dizaines à des centaines d'années pour des composés ligneux très récalcitrants. Cette variabilité est liée à la composition chimique du matériel en décomposition (Craswell & Lefroy, 2001).

La première étape de la dégradation est liée à l'action des champignons se propageant à travers les espaces libres du tissu végétal ou mésophylle, provoquant ainsi une modification des parois cellulaires sans pour autant pénétrer dans les cellules: on parle alors de colonisation fongique primaire. Ces champignons peuvent être présents sur l'arbre ou coloniser le matériel seulement au contact du sol (Kachaka *et al.*, 1993 ; Lavelle *et al.*, 2004).

Par ailleurs, la macrofaune détritivore (vers de terre et termites) et microfaune (nématodes et microarthropodes) fragmentent, ingèrent, digèrent et rejettent sous forme de fèces le matériel colonisé et le met en contact avec un cortège de bactéries, dites saprophytes. Les bactéries et les champignons saprophytes sont capables de dégrader les fèces non digérés par les détritivores et opèrent la dernière transformation de la MO. Les molécules carbonées du

matériel en décomposition constituent ainsi l'énergie de ces organismes que l'on appelle organismes décomposeurs.

### 1.8.2. Classification fonctionnelle de la faune du sol

Les communautés du sol peuvent être divisées en trois grands groupes fonctionnels basés sur la taille (Tableau 1).

*Tableau 1. Classification fonctionnelle de la faune du sol*

Taille	Groupes fonctionnels	Types d'invertébrés
< à 0,2 mm	Microfaune	Protozoaires, Nématodes, Rotifères
De 0,2 à 4 mm	Mésafaune	Enchytréides, collemboles, Protoures, Diploures, Acariens...
De 4 à 100 mm	Macrofaune	Lombricidés, Insectes sociaux, Myriapodes, Mollusques, Isopodes, Arachnides.

Source : classement de la faune par taille (critère théorique) (Bachelier, 1978)

Un classement selon le régime alimentaire montre également une grande diversité taxonomique et écologique de ces communautés. On sait cependant que la macrofaune du sol est très diversifiée et à la fois très sensible à toute modification du milieu. Ses diverses composantes répondent différemment suivant leur adaptabilité (Folgarait *et al.*, 2003).

Parmi les invertébrés du sol, il est aujourd'hui possible de définir trois groupes fonctionnels : les micro-prédateurs, les transformateurs de litière et les ingénieurs écologiques (Lavelle, 1997). Ces trois groupes se définissent principalement par la nature de leurs interactions avec la microflore du sol et leur capacité à créer des biostructures :

- les micro-prédateurs (protozoaires, nématodes), ils ne créent pas de structures spécifiques mais régulent les activités microbiennes par leur prédation;
- les transformateurs de litière (acariens, collemboles, enchytréides, coléoptères, cloportes) comprennent les invertébrés qui dégradent physiquement les litières et créent des structures purement organiques (pelotes fécales) au sein desquelles les microorganismes trouvent des conditions favorables à leur développement (digestion externe);

- les ingénieurs écologiques (fourmis, termites, lombrics) regroupent les invertébrés qui créent des structures organo-minérales durables, qui interagissent avec les microorganismes directement au niveau de leur tube digestif (digestion interne) et dans les structures qu'ils créent. Ces structures correspondent à des déjections, des galeries, des dômes, etc. (Decaëns *et al.*, 2001).

Ces organismes occupent une position clé puisqu'ils influencent la diversité et l'activité des autres groupes fonctionnels et des microorganismes, et donc le recyclage des nutriments. Dans le groupe des transformateurs de litière (mille-pattes, cloportes, acariens, collemboles), on peut citer le fort caractère indicateur des collemboles vis-à-vis du fonctionnement des formes d'humus forestiers (Edwards & Shipitalo, 1998). Ces ingénieurs du sol sélectionnent la taille et la qualité des particules organiques et minérales qu'ils ingèrent, en fonction de la taille de l'individu considéré et du type de sol (Barois, 1992). Il semble que dans le meilleur des cas, les vers de terre sélectionnent les grosses particules organiques et les fines particules minérales. Les termites affectent également la texture du sol. Par ailleurs, comme les vers de terre, l'activité des termites affecte fortement la rugosité de surface, la porosité et l'agrégation. Ces paramètres influent significativement sur les propriétés hydrauliques du sol et plus particulièrement l'infiltration de l'eau et la circulation de l'air. Les galeries des vers de terre et des termites ne représentent que 1 % du volume de sol (Lepage, 1979 ; Lee, 1985), mais elles régulent fortement l'infiltration de l'eau. Les vers endogés favorisent la formation des macro-agrégats très stables, d'autres catégories par contre réduisent ces structures en turricules granulaires empêchant l'accumulation des turricules compacts, opérant ainsi une régulation de l'agrégation du sol (Blanchart *et al.*, 1999).

### **1.8.3. Matière organique, élément clé du fonctionnement des sols**

La matière organique (MO) participe aux propriétés chimiques, physiques (création et stabilisation des agrégats) et biologiques des sols (ressource trophique) (Duchaufour, 1997). La matière organique des sols (MOS) est composée de MO vivante (pédofaune, racine, micro-organismes) et de MO morte (résidus d'organismes vivants à différentes étapes de dégradation) (Gobat *et al.*, 2010). Les MOS mortes comprennent des groupes labiles facilement biodégradables par opposition à des groupes stables, qui le sont plus difficilement. Le Carbone des matières organiques particulières (MOP), le C soluble et le C potentiellement minéralisable sont considérés comme des groupes labiles. Le pool stable correspond aux



matières organiques humifiées. Ces distinctions reviennent à compartimenter les MOS en fonction de leur temps de résidence dans le sol. Les MOS sont donc formées par un ensemble de fractions qui diffèrent par leur composition.

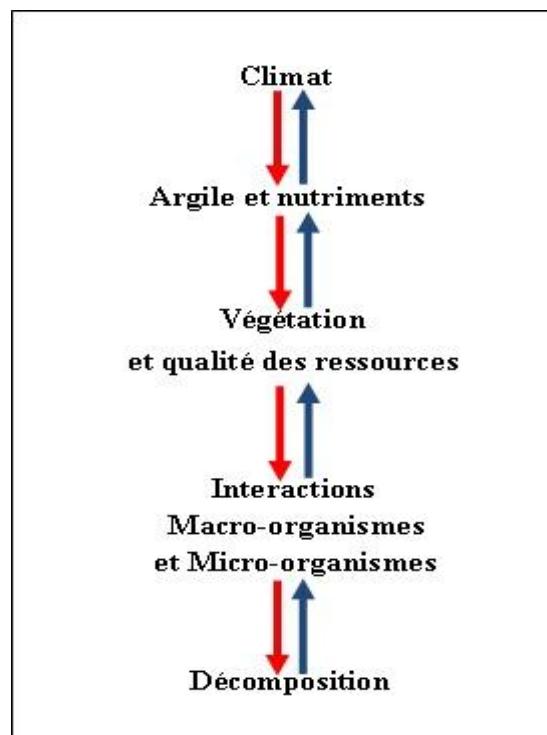
Les voies d'incorporation du C de la biomasse dans le sol sont principalement constituées par l'action de différents organismes du sol et par le C exsudé par les racines (Jiménez & Lal, 2006). Le C de la biomasse entre dans le sol par les processus complexe de décomposition, de minéralisation et d'humification. La minéralisation est le processus par lequel les molécules organiques sont transformées en formes inorganiques assimilables par les plantes, l'humification est un processus par lequel les niveaux de MOS sont maintenus. Les problématiques actuelles relatives aux changements globaux ont motivé un effort conséquent pour l'étude des facteurs affectant la décomposition (immobilisation/minéralisation) biologique de la MO (Zech *et al.*, 1997 ; Bond-Lamberty *et al.*, 2004). Le carbone organique du sol est ainsi un réservoir en équilibre dynamique entre les entrées et les pertes. Si la majorité de ce carbone est présent sous une forme stable, des changements dans les flux d'assimilation et de minéralisation de ce système peuvent avoir d'importants impacts sur le cycle global du carbone.

Dans les écosystèmes, les interactions de la faune du sol avec les MOS ont des rôles cruciaux, comme la régulation de la fertilité des sols ou la création et la maintenance de la structure des sols (agrégation du sol et stabilité structurale des agrégats créés). Les mécanismes de stabilisation des agrégats dépendent de leur nature, biologique ou physico-chimique. Dans les biostructures créées par la pédofaune, les polysaccharides produits par les micro-organismes collent les particules ensemble dans les agrégats (Gijssman & Thomas, 1995). La présence d'un cortex autour des biostructures contribue aussi fortement à leur stabilité structurale, créant ainsi des conditions anaérobiques qui réduisent la minéralisation à l'intérieur des biostructures (Elliot *et al.*, 1990). Ainsi, le C organique du sol est protégé de la décomposition et la production de biostructures peut contribuer à la formation d'un pool de C physiquement protégé même s'il reste actif (Lavelle & Martin, 1992 ; Guggenberger *et al.*, 1996).

Les effets des vers de terre sur la MO sont très contrastés en fonction de l'échelle spatiotemporelle considérée. La minéralisation de la MO est fortement accélérée au niveau du transit intestinal des vers de terre. Leur digestion a pour résultat la fragmentation des débris végétaux ingérés et la libération d'une quantité significative d'azote et du phosphore minéral

(Barois *et al.*, 1987 ). A plus long terme, les vers de terre affectent la dynamique de la matière organique à travers des structures biogéniques produites, c'est ainsi que beaucoup de services écologiques reposent sur la MOS, notamment, le cycle des nutriments, la production primaire, la provision d'habitat et de ressources (services de support de la vie), la régulation de l'eau et du climat, la détoxification (services de régulation) ainsi que l'agriculture et la production de carburant vert (services d'approvisionnement) (Lavelle, 1997)

Lavelle *et al.* (1993) ont proposé un modèle hiérarchique de décomposition afin d'évaluer les relations entre les différentes phases du cycle biogéochimique. Le niveau supérieur est le climat, le deuxième niveau est la teneur en argile et en nutriments, le niveau suivant est la végétation et la qualité de la ressource. Le niveau qui vient ensuite est les macro-organismes et les micro-organismes. Enfin vient la décomposition.



*Figure 3. Modèle hiérarchique des facteurs contrôlant les processus de décomposition de la MO au sein des écosystèmes terrestres (Lavelle et al., 1993).*

Ce modèle est basé sur l'idée selon laquelle les processus du sol sont déterminés par une suite de facteurs dont l'effet dépend de l'échelle de temps et de l'espace auquel ils opèrent (Figure 3). Les facteurs agissant largement contraignent ceux qui agissent localement (Lavelle *et al.*,

1993). Au niveau inférieur de ce modèle se trouve le processus de régulation biologique issu de l'activité de la faune du sol.

La régulation des processus écologiques du sol se fait à des échelles spatio-temporelles variables. Ainsi, la décomposition de la MO dans les écosystèmes terrestres est déterminée par des facteurs organisés hiérarchiquement, qui régulent l'activité des micro-organismes à des échelles décroissantes de temps et d'espace : le climat, la minéralogie des argiles et les éléments nutritifs, la végétation et la qualité de la ressource et enfin les organismes du sol (Lavelle *et al.*, 1993).

La régulation de la dynamique de la MOS est donc influencée par la nature et la persistance dans le temps des structures fabriquées par les invertébrés qui influencent directement la minéralisation et l'humification (Lavelle, 1997). De plus, de récentes études ont montré la spécificité des structures produites par chaque espèce (Decaëns *et al.*, 2001 ; Hedde *et al.*, 2005 ; Mora *et al.*, 2005).

#### **1.8.4. Contribution de la macrofaune dans le fonctionnement du sol**

##### **1.8.4.1. Rôle des invertébrés dans la qualité du sol**

Le sol est de moins en moins considéré comme une simple « boîte noire » dont l'utilité se limite à l'apport de nutriments nécessaires à la croissance des plantes (Lavelle & Spain, 2001). En effet, le sol contient un des assemblages les plus complexes d'organismes vivants, qui interagissent avec les composantes organiques et inorganiques d'un sol. Parmi ses constituants biotiques, les invertébrés sont des acteurs importants dans ces interactions. De ce fait, ils ont un impact majeur au niveau des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol, assurant le maintien de la capacité de celui-ci à générer des services écosystémiques (Lavelle, 2002 ; Lavelle *et al.*, 2006).

Ces services écosystémiques concernent l'approvisionnement en eau, le cycle des nutriments, la formation des sols, la régulation du climat ou encore le contrôle de l'érosion. Parmi les invertébrés du sol, les vers de terre sont considérés comme les acteurs les plus importants dans la formation des sols, dans le maintien de la structure et de la fertilité des sols. Ils représentent la biomasse animale la plus importante des sols dans la plupart des écosystèmes terrestres. Des ouvrages comme « The formation of vegetable mould through the action of

worms » écrit par Charles Darwin en 1881, ont très tôt rapporté l'importance des vers de terre en termes de fragmentation de la matière végétale et animale morte, du remaniement et de la stabilisation de la structure du sol, de l'aération, du drainage et de la fertilité. La figure 4 résume schématiquement le rôle de la microfaune dans le fonctionnement du sol.

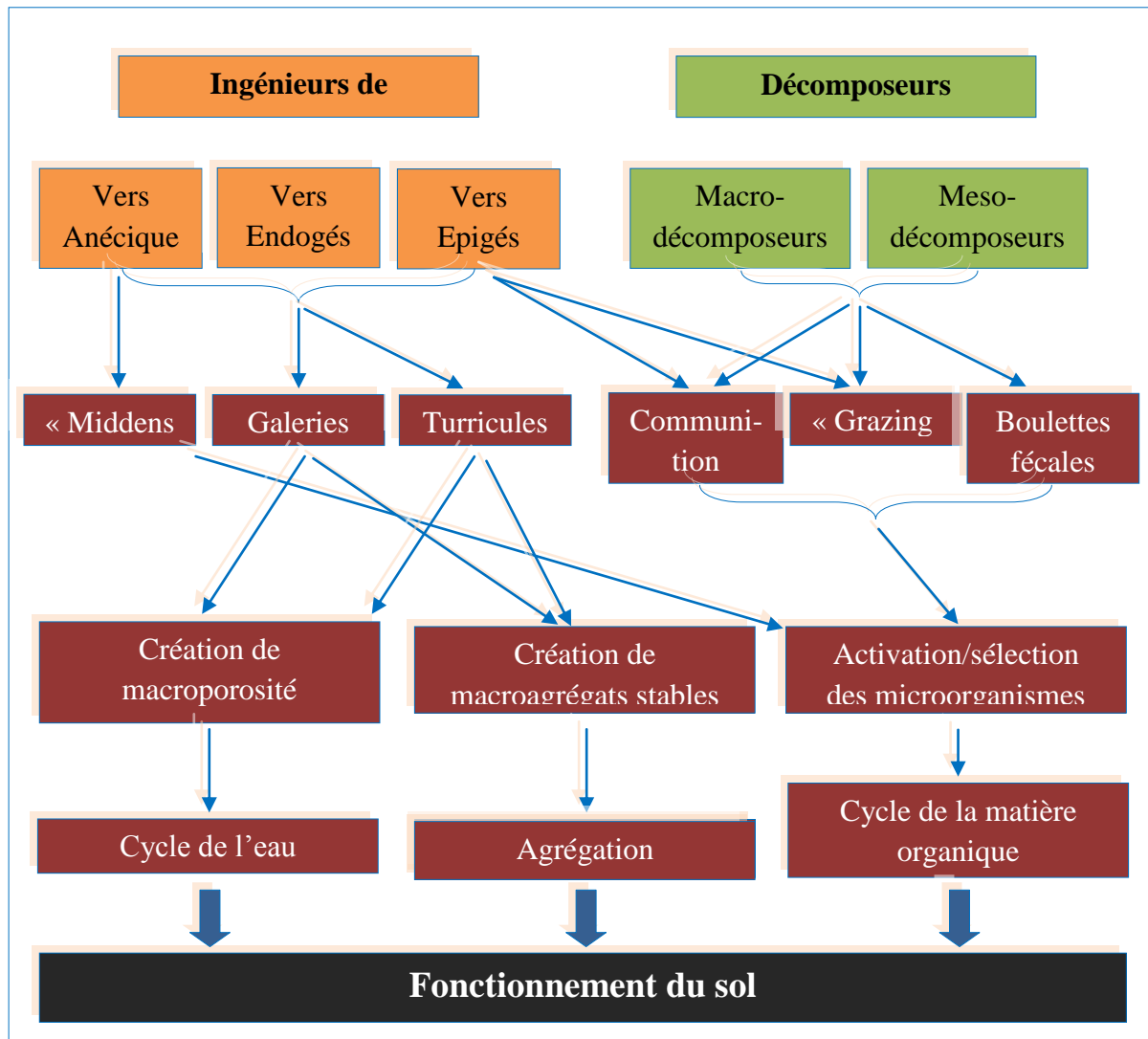


Figure 4. Schéma explicatif des rôles des décomposeurs et des ingénieurs de l'écosystème dans le sol (Lavelle et al., 2006).

### 1.8.5. Notion de productivité

La MO est un constituant essentiel des sols. Elle lui confère des propriétés physiques en participant au maintien de sa fonction chimique par la constitution de réserves disponibles pour les plantes et les animaux d'éléments nutritifs et énergétiques. Pour ces raisons, la MOS est considérée comme un indicateur important participant à la définition de la fertilité des sols

laquelle est conçue, dans une première approche comme un potentiel de production végétale dont l'appréciation est liée à la connaissance des composantes physico-chimiques (EEW., 1994).

Il s'en suit que dans le contexte des indicateurs utilisés en agriculture, la biodiversité rencontrée dans les sols est couramment associée à la fertilité du sol. Tout en soulignant que, ce n'est pas la diversité des espèces en tant que telle, mais plutôt les fonctions (décomposition de la matière organique, cycle des nutriments, stabilisation de la structure...) remplies par des groupes d'organismes ou des espèces particulières telles que les vers de terre qui permettent au sol de constituer un milieu fertile (Colinet *et al.*, 2004). Autrement dit, que ces fonctions soient assurées par quelques espèces-clés ou par une grande diversité d'espèces n'a pas de conséquence directe en termes de fertilité. En effet, une fonction donnée peut être remplie par un grand nombre d'espèces différentes, phénomène que l'on désigne sous le terme de redondance fonctionnelle (Mérelle, 1998). La fertilité d'un sol fait classiquement référence à une aptitude à produire de la biomasse végétale (en quantité et en qualité). La fertilité est l'aptitude à produire d'un milieu dont on apprécie les diverses caractéristiques. Elle est aussi la résultante d'effets multiples et indépendants caractéristiques du milieu géographique ainsi que de l'action de l'homme.

En fonction de ces deux groupes des facteurs, la fertilité naturelle, lié au premier groupe, se distingue de la fertilité acquise reliée au second. Il est cependant plus réaliste de distinguer les facteurs qui relèvent des conditions naturelles (climat, sol), difficilement modifiables par les agriculteurs, de ceux au contraire sur lesquels l'homme agit aisément (Mérelle, 1998).

La fertilité du sol dépend à la fois des caractères pédogénétiques (propriétés morphologiques intrinsèques issues de la pédogenèse) et de ses caractères fonctionnels (propriétés physico-chimiques) (Duchaufour, 1997). Parmi les propriétés physiques du sol, la structure joue un rôle important dans la fertilité. Si la porosité renseigne sur la capacité hydrique du sol, en termes de réservoir, la circulation de l'eau dépend du mode d'arrangement des pores c'est-à-dire de leur tortuosité et de leur connectivité. Une diminution de la porosité (compaction) est souvent interprétée comme une dégradation du sol et donc une réduction de sa fertilité.

#### 1.8.5.1. Fertilité et disponibilité des éléments nutritifs dans les sols

Les sols sont des milieux complexes et hétérogènes en continuelle évolution et qui, de plus, remplissent plusieurs fonctions environnementales. Ils sont étudiés en termes de constitution, d'organisation et de fonctionnement au sein de systèmes dynamiques «sol-plante-eau-animal-atmosphère», en considérant les risques environnementaux engendrés par des pratiques agricoles et sylvicoles inadaptées (Laroche & Oger, 1999).

En matière de fertilité, le potentiel de production d'une parcelle ou d'une station, pour une culture ou une essence forestière donnée, est fonction des propriétés du sol (fertilité intrinsèque) mais également des caractéristiques climatiques. Climat et sols concourent à un environnement pédoclimatique c'est-à-dire à un ensemble de conditions favorables ou contraignantes interdépendantes pour la croissance végétale que Mérelle (1998) rappelle comme suit:

- la fertilité physique : qui détermine les conditions de germination des semences, de colonisation efficace des racines, d'aération et d'économie en eau et ce, à travers une structure meuble, perméable et aérée du sol, retenant l'eau et en évacuant les excès ;
- la fertilité chimique : qui a trait à la nutrition minérale des végétaux via les concepts de biodisponibilité des éléments, de carences, de toxicités et d'équilibres ;
- la fertilité biologique : qui est liée à l'activité biologique dont dépendent les transferts des nutriments du sol à la plante ainsi que la minéralisation des matières organiques apportées.

Concernant les éléments nutritifs, ceux-ci sont présents dans les sols sous différentes formes (cations, anions, complexes) et à des concentrations variables en fonction de la nature des sols et du type de fertilisation pratiquée. Chaque élément joue un rôle spécifique dans la croissance des végétaux. La plupart de ces éléments sont indispensables pour les organismes qui consomment des végétaux, certains d'entre eux (comme le calcium) pouvant jouer un rôle essentiel au niveau de la faune du sol. Seule une partie de la quantité d'éléments nutritifs présents dans les sols est réellement disponible pour la plante. En effet, la matière organique et les minéraux du sol doivent être transformés (respectivement par minéralisation et dissolution) pour que leurs éléments constitutifs soient assimilables par les végétaux (Mérelle, 1998). Ces derniers sont :

1. Carbone (C) : élément constitutif de la matière organique, assimilé à partir de l'atmosphère sous forme de  $\text{CO}_2$  (photosynthèse par les végétaux, assimilation pour certains micro-organismes).
2. Azote (N) : élément constitutif des organismes vivants, assimilé par les végétaux essentiellement sous forme de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) ou d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) à partir de la solution du sol. Un excès de N dans le sol peut entraîner une concentration en nitrate trop importante dans les plantes et un risque de lixiviation et de contamination des eaux
3. Phosphore (P) : joue le rôle plastique (paroi cellulaire) et métabolique (échanges énergétiques (ATP/ADP)).
4. Potassium (K) : intervient au niveau de l'absorption et du transport de l'eau ainsi que dans l'activation d'enzymes.
5. Calcium (Ca) : neutralise des anions minéraux et organiques, diminue la toxicité de certains éléments (comme l'aluminium), consolide des parois cellulaires et améliore la résistance aux stress externes. En excès dans le sol, le Ca peut provoquer, chez certains végétaux, des carences induites en d'autres éléments.
6. Magnésium (Mg) : est partie intégrante de constitution de la chlorophylle, participe à la synthèse des acides aminés, à l'assimilation et transport du P, résistance aux stress. En cas de carence, le Mg migre vers les parties les plus jeunes de la plante et provoque un jaunissement des feuilles plus âgées.
7. Soufre (S) : est le composant essentiel des protéines intervenant notamment dans la synthèse des acides aminés soufrés
8. Fer (Fe), Zinc (Zn), Cuivre (Cu), Molybdène (Mo), Bore (B) : sont des oligo-éléments ayant un rôle métabolique, cofacteurs dans la constitution et le fonctionnement d'enzymes, catalyseurs ou inhibiteurs de diverses réactions biochimiques. Ils doivent être fournis à la plante à des doses relativement faibles, sous peine d'induire des risques de toxicité.

On ne peut dissocier la fertilité de la disponibilité en éléments nutritifs et des biostructures du sol. En effet, les activités de décomposeurs sur la MO (bioturbations) restituent au sol, à travers les processus de décomposition, les éléments nutritifs qui constituent une importante source d'azote pour les plantes. C'est pourquoi les lombriciens constituent une piste pour l'amélioration des conditions de fertilité des sols surtout sous le climat tropical où la minéralisation de la matière organique est très rapide.

## **Chapitre 2. Matériel et méthodes**

### **2.1. Description du site d'étude**

#### **2.1.1. Introduction**

Afin d'atteindre les objectifs définis pour cette étude, la RDCBL a été choisi pour la conduite des expérimentations en raison de son accessibilité en toutes saisons. Elle est en plus constituée d'une collection d'écosystèmes exceptionnels, variés qui se prêtent bien à l'étude envisagée. Comme toutes les aires protégées, celle-ci a pour objectif de promouvoir la conservation et l'utilisation durable des ressources naturelles. Elle est actuellement confrontée à une triple menace d'abord la proximité de la ville de Kinshasa qui engendre une pression croissante sur les ressources du site; ensuite la méconnaissance du contexte institutionnel et le non-respect des lois par les populations qui rendent ardue la gestion du lieu ; et enfin, la situation de crise (politique, institutionnelle et sociale) que connaît la RDC depuis de longues années qui ne permet pas aux personnes chargées de la gestion de disposer de moyens suffisants afin de prendre correctement en main l'organisation du domaine.

En effet, l'exploitation de ce milieu dans l'enfilade des épisodes de l'histoire de la RDC affiche des accents d'inconscience destructrice. La colonisation humaine et agricole, la production de charbon de bois pour subvenir aux besoins domestiques et le braconnage sont autant d'activités qui ont conduit inéluctablement à la fragmentation de la forêt en plusieurs faciès de dégradation. Or, il existe une forte corrélation entre la déforestation et la disparition des espèces ou la perte de la biodiversité. Parmi lesquelles, les invertébrés comme par exemple les vers de terre qui jouent un rôle majeur dans la structuration et le fonctionnement du sol. Ils gouvernent la fertilité du sol en régulant la décomposition de la matière organique (Blanchart *et al.*, 2004). Dans cette aire protégée, la recrudescence de la déforestation prend une allure inquiétante, ce qui remettrait en cause la diversité lombricienne, voilà pourquoi une attention soutenue devait être alors portée à l'égard de cette dernière.

#### **2.1.2. Localisation et organisation administrative**

Le site de Bombo-lumene est situé à l'Est du centre-ville de Kinshasa, plus précisément aux limites de la commune urbano-rurale de Maluku à 130 km du centre-ville. Ce domaine s'étend



sur 300.000 ha. Il se limite au Nord par la route National n°1 (Kinshasa-Kikwit), au Sud par le territoire de Kasangulu, à l'Ouest par la rivière Muti-mutiene et à l'Est par la rivière Lufini. La station, siège de l'administration du domaine, est reliée à la Nationale n°1 par une piste non bitumée de 6 km. Elle est située à 4°25'16,6 '' de latitude Sud, 16°3'1,7'' de longitude Est et à 621 m d'altitude (Milau *et al.*, 2015).

Statutairement cette aire protégée inclut une réserve intégrale et un domaine de chasse créés respectivement en 1976 et en 1968. Dans la réserve toute action sur l'écosystème est normalement interdite (chasse, pêche, cueillette, habitat, etc.) tandis que dans le domaine de chasse l'exploitation des ressources est autorisée, pour peu qu'elles soient respectueuses de l'environnement, la chasse, la pêche, la cueillette et l'agriculture non mécanisée sont permises tant qu'elles ne sont pas menées de façon intensive. Le but est évidemment de permettre à la faune et à la flore de mieux se régénérer.

Le domaine a été créé par l'arrêté n° 0021 du 10 avril 1958. L'arrêté n° 007 du 10 janvier 1968, a institué le domaine dans ses limites actuelles et le 16 avril 1976, l'arrêté n° 0621 a créé à l'intérieur du domaine de chasse une réserve faunistique et forestière (Milau *et al.*, 2015).

### **2.1.3. Climat et sol**

Le climat de la région est tropical humide du type AW<sub>4</sub> selon la classification de Köppen c'est-à-dire avec une saison sèche de quatre mois sans pluies (juin à septembre), une saison pluvieuse (octobre à avril); mai et octobre constituant des mois de transition (Milau *et al.*, 2015).

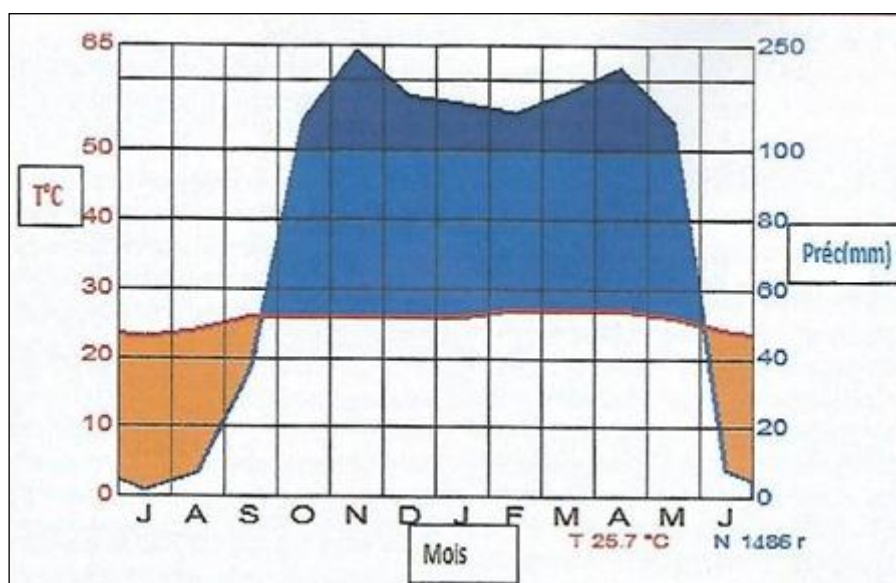
Les sols sont classifiés comme Rubique Ferralique Arénosol (Dystrique) selon le système de classification WRB (IUSS Working Group WRB, 2006), et comme Quartzipsamment Ustoxique Isohyperthermique suivant la classification américaine (Soil Survey Staff, 2006). Les sols de la couche arable ont une composition granulométrique moyenne de l'ordre de 3,4 % argile, 5,6 % limon et 91,0 % sable, et possèdent une densité apparente d'environ 1,25 (Kasongo *et al.*, 2009).

La précipitation annuelle varie entre 1.300 et 1.600 mm (Tableau 2) avec une distribution bimodale inégalement répartie le long de l'année (Figure 5). La température annuelle

moyenne est de 25,7 °C et la moyenne mensuelle la plus élevée (27,1°C) se situe durant le mois d'avril ; le mois d'août est le mois le plus frais avec une température moyenne de l'ordre de 23,2 °C.

*Tableau 2. Synthèse des données climatiques (2000 à 2012) de la station de Bombo-lumene*

Mois	Précipitations (mm/mois)	Températures (°C)
Juillet	6,2	23,4
Août	17,00	23,2
Septembre	76,9	25,6
Octobre	168,8	26,3
Novembre	242	26,4
Décembre	238,3	26,1
Janvier	157,1	26,4
Février	125,2	26,8
Mars	164,3	27,0
Avril	201,9	27,1
Mai	164,2	26,0
Juin	13,1	24,2
<b>Moyenne annuelle</b>	<b>131</b>	<b>26</b>



*Figure 5. Diagramme ombrothermique (station de Bombo-lumene) de 2000 à 2012*

#### **2.1.4. Hydrographie**

Quatre rivières parcourent la RDCBL notamment la Lufimi qui constitue la limite Est du Domaine, la Bombo et la Lumene qui coulent de part et d'autre de la partie érigée en Réserve. Le prolongement de ces deux rivières au Nord-ouest du Domaine forme une branche qui rencontre la rivière Muti-mutiene pour former la rivière Mai-ndombe. La Muti-mutiene forme la limite Ouest du Domaine de chasse. A l'intérieur du Domaine et de la Réserve, des étangs et des mares constituent les habitats des oiseaux ainsi que des abreuvoirs des animaux.

#### **2.1.5. Végétation**

Deux types d'écosystèmes constituent la végétation de la RDCBL, il s'agit des écosystèmes forestiers et des écosystèmes savanicoles (Ladmirant, 1964). Ces derniers prédominent cette zone. Deux critères les caractérisent :

- l'absence d'arbres ou s'il y en a, leur hauteur est inférieure à 20 m, les cimes sont très disjointes et l'ensemble du couvert est très éclairci;
- la présence d'une strate graminéenne facilitant la circulation des feux. Ces aspects distinguent les savanes par rapport à d'autres végétations en particulier les forêts claires. A Bombo-lumene on distingue cinq types de savanes : herbeuses, arbustives, arborescentes, boisées et steppiques

##### **2.1.5.1. Ecosystèmes savanicoles**

###### ***2.1.5.1.1. La savane herbeuse***

Elle se caractérise par l'absence des arbres et arbustes (Habiyaemye *et al.*, 2011) ;

###### ***2.1.5.1.2. La savane arborescente***

Elle comporte aussi un tapis des graminées. Néanmoins, sa physionomie et sa structure se distinguent des autres par la présence d'arbres. Ceux-ci ont une petite taille mais pouvant dépasser 7 m de haut, avec un recouvrement de plus ou moins 20 % de la superficie de l'habitat. Ce type de savane constitue 6 à 7 % de la RDC (Mulumba, 2004 ; Vancutsem *et al.*, 2006) et est répandue surtout dans la province du Katanga dont elle couvre 29 % de la superficie ;

### *2.1.5.1.3. La savane boisée*

Elle se caractérise plutôt par une densité d'arbres plus élevée et par une plus grande abondance d'herbes différentes des graminées. C'est une végétation intermédiaire entre la véritable savane et la forêt claire et est presque aussi dense en arbres que celle-ci. Cependant, dans la savane boisée, les arbres ont une hauteur plus faible. Alors que les savanes steppiques comprennent une grande proportion des plantes annuelles souvent entre les herbes vivaces largement espacées, ces herbes ont des feuilles étroites, enroulées ou repliées, surtout basilaires et ont généralement moins de 80 cm de hauteur. Comme partout en Afrique, les savanes sont parcourues par les feux de brousse annuels qui empêchent même quand cela est possible l'évolution progressive vers une formation forestière.

### *2.1.5.2. Ecosystèmes forestiers*

Selon la physionomie, les forêts sont des étendues dont le couvert comporte nécessairement des arbres. Leurs cimes sont plus nettement rapprochées que celles des savanes; la strate graminéenne est à peu près complètement absente (Karousakis & Coffee-Morlot, 2007).

#### *2.1.5.2.1. Les forêts denses semi-décidues*

Habitat considéré comme le plus évolué de la série des forêts de terre ferme. Elles couvrent des superficies beaucoup moins étendues que celles des savanes. Son qualificatif de semi-décidue indique que les arbres perdent partiellement leurs feuilles surtout durant la grande saison sèche (Mulumba, 2004) ;

#### *2.1.5.2.2. Les galeries forestières*

Ce terme désigne des forêts établies le long des cours d'eau (Figure 6). Elles occupent les fonds des plaines de la Bombo et de la Lumene dans la RDCBL, de la Lufimi à Mbankana, de la Mutiene, de la Mai-ndombe et de la Duale. Elles s'étendent à quelques dizaines de mètres de largeur à partir des rives de ces rivières. En général cet habitat est entouré par des savanes arbustives (Mulumba, 2004 ; Habiwaremye *et al.*, 2011).

#### ***2.1.5.2.3. Les forêts secondaires***

Les forêts secondaires jeunes succèdent directement aux friches (recrûs) pré-forestiers. Cette succession est habituellement très rapide car les éléments de deux stades sont simultanément présents sur le terrain. Ces forêts se caractérisent en général par trois strates dominées par des arbres à croissance rapide comme *Musanga cercropioïdes*. L'énorme quantité de lianes et un fouillis d'herbes font de ces forêts un milieu difficile à pénétrer et ombrageux ; les forêts secondaires vieilles constituent la série d'habitats de plus en plus évolués. Ce stade est caractérisé par de grands arbres. Ils poussent dans les forêts secondaires jeunes, les remplacent et durent plus longtemps que leurs prédécesseurs avant d'être relayés à leur tour par les espèces de forêts mûres (Habiyaemye *et al.*, 2011).

#### ***2.1.5.2.4. Les forêts alluviales***

Il s'agit de lambeaux de forêts qui se maintiennent le long de banquettes formées par des dépôts des sédiments apportés par les eaux, sur une surface dépassant 30 m de largeur à partir de rivières. Cette extension et leur linéarité moins systématique permettent de distinguer ce type d'habitat par rapport aux galeries forestières. Le confluent de la Bombo et de la Lumene est l'endroit où la forêt alluviale a été observée. Elle se particularise localement par l'émergence d'*Alstonia congensis* (Habiyaemye *et al.*, 2011).

### **2.1.6. Ressources faunistiques**

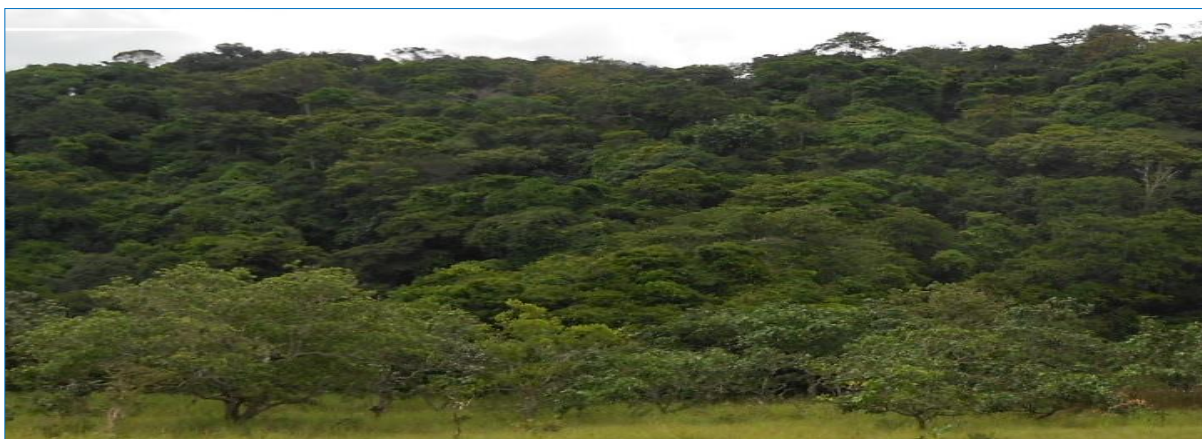
La faune autrefois très diversifiée, était composée de mammifères, des reptiles, des oiseaux et des poissons. Et contribuait énormément à la sécurité alimentaire des populations riveraines étant d'un apport substantiel en protéines animales. A sa création, cette aire protégée abritait plusieurs espèces dont certaines ont disparues notamment de l'Elan du Cap (*Tragelaphus oryx*), du lion (*Panthera leo*), de l'éléphant (*Loxodonta africana*) et autres antilopes.

Cependant, aujourd'hui cette faune subit une forte pression du fait de la pauvreté de la population humaine et de l'explosion démographique de la ville de Kinshasa qui accentue la demande en viande de brousse.

### 2.1.7. Atouts du Domaine

Le site de Bombo-lumene offre une nature attractive. Outre la présence des oiseaux et grands mammifères précités, la RDCBL offre aussi des paysages verdoyants constituent des atouts que le Domaine peut exploiter dans le cadre d'un marketing écotouristique. Parmi les activités on note :

- la traversée de la Lumene par le pont suspendu en lianes ;
- la randonnée pédestre le long de la même rivière sur un sentier aménagé ;
- la natation dans les eaux rafraichissantes de Lumene ;
- la vue panoramique de la nature dans les hauteurs de la station;
- le camping à l'air frais, sous le couvert végétal verdoyant et reposant ;
- la pêche sportive sur la Lumene ;
- l'observation de l'avifaune au niveau des mares ;
- la vue des animaux sauvages.



*Figure 6. Vue d'une galerie forestière*

### 2.1.8. Problèmes de gestion du site

#### 2.1.8.1. Milieu humain

Le Domaine renferme environ une vingtaine de villages dont la cité de Mbankana, Mutiene I, Dumi, Inzolo, Buantaba, Nga, Limbimi, Kivunda, Kinta I, Linturi, Mbiena, Kinsia, Bitambi. La population dans le Domaine de chasse est répartie inégalement suivant les pôles de concentration. La RDCBL renferme vingt et un villages, la cité de Mbankana et les huit cités des fermiers créés par CADIM.

Des multiples problèmes de gestion se posent, à savoir :

- l'effectif réduit de dix-sept gardes par rapport à l'immensité du Domaine. Ils sont sous-équipés et n'ont pas de formation requise. Ils manquent de moyens de déplacement et de communication. De ce fait, les gestionnaires ne maîtrisent pas tout le Domaine. Les gardes se plaignent de recevoir des salaires modiques ;
- la pratique de feu de brousse circulaire et incontrôlée par les populations est courante ;
- le braconnage, la carbonisation illicite et l'exploitation anarchique de terre par la mécanisation et l'agriculture itinérante sur brûlis entament significativement la faune et la flore ;
- la redistribution des terres par les chefs coutumiers,
- l'implantation de nouveaux villages ;
- le déclassement de 5.000 hectares de terres au profit du CADIM en destination des fermiers non autochtones ;
- l'indifférence de la population vis-à-vis des objectifs de la conservation, de gestion rationnelle et durable du Domaine. En effet, la population est associée ni à la gestion, ni au partage des bénéfices générés par le tourisme ;
- l'absence d'un plan d'aménagement ;
- la démotivation du personnel à cause de ses conditions socio-économiques difficiles dans le Domaine.

#### **2.1.8.2. Facteurs de la dégradation du couvert végétal**

Les principaux facteurs directs des changements d'occupation des sols émanant des activités humaines sont l'intensification de l'agriculture, la déforestation entraînée par la production de charbon, les feux de brousse, la pression démographique, le braconnage et la faiblesse institutionnelle.

##### ***2.1.8.2.1. Agriculture intensive***

Sous la pression de la crise socio-économique, l'activité agricole a toujours procuré à la population rurale et périurbaine des revenus nécessaires pour la survie. L'agriculture s'est intensifiée pour faire face aux besoins alimentaires. Elle est basée sur les cultures vivrières annuelles (le maïs, le manioc, la courge, le niébé, l'arachide...) pour l'autoconsommation et la

commercialisation. De toutes les causes de dégradation identifiées, l'impact de l'agriculture est la plus importante. Les superficies déboisées à cette fin font aujourd'hui 146 ha. Cette activité est donc responsable à 60 % de la dégradation des forêts et savanes de la RDCBL. Les agriculteurs sont les principaux acteurs directs du changement d'occupation du sol. Le contexte économique joue également un rôle déterminant dans les changements d'utilisation des sols, il peut notamment avoir un lien avec les politiques agricoles, l'évolution des prix de productions agricoles peut aussi expliquer l'extension des pools agricoles.

#### *2.1.8.2.2. Production de charbon de bois*

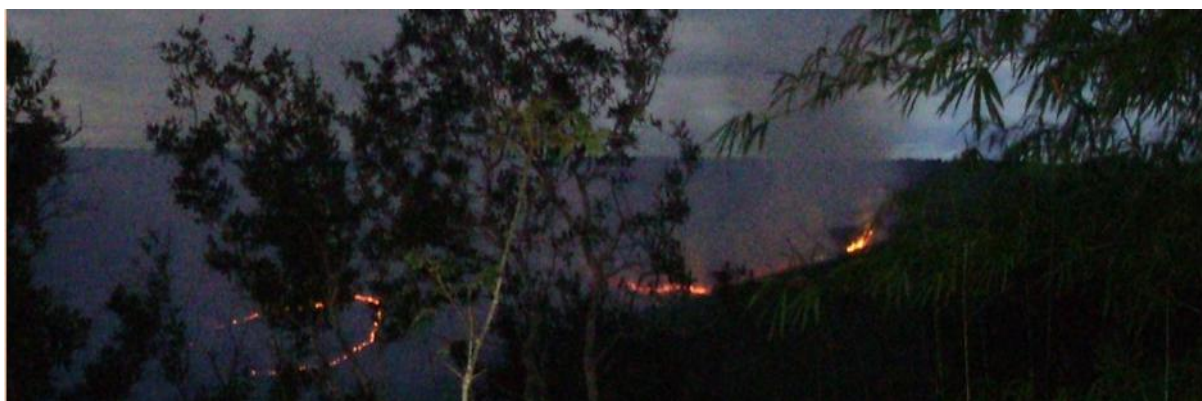
L'un des facteurs de la déforestation et de changement d'utilisation du sol est l'exploitation abusive et non contrôlée des ressources végétales dans le but de satisfaire les besoins en bois de chauffe et charbon de bois d'une part, et en bois d'œuvre et de service d'autre part. Cette dégradation a été accélérée dans les régions de Bombo-lumene, suite à l'accroissement de la demande en énergie bois, principale source d'énergie domestique pour plus 80 % de ménages locaux et pour un bon nombre d'unités artisanales. La production de charbon de bois représente sur le plateau de Batékés, une des rares sources des revenus immédiats de la population masculine locale. L'impact environnemental de cette exploitation est important et le sera d'autant plus que le secteur des énergies traditionnelles est caractérisé par d'énormes pertes.

L'exploitation irrationnelle des essences pour le bois d'œuvre et de service a contribué à une raréfaction des essences forestières de valeur telles que *Milicia excelsa*, *Entandrophragma utile*, *Prioria balsamifera*, *Gilbertiodendron dewevrei*, *Entandrophragma cylindricum*... Ces prélèvements sont une des causes primordiales de la modification et de la destruction des habitats de la faune sauvage dont résulte l'érosion de la diversité animale et végétale. Les plus grands villages comme Mbankana et Dumi, augmentent la pression exercée sur le site protégé. Le mode opératoire est basé sur les meules ou fours traditionnels rudimentaires. Après l'abattage on procède au morcellement, au débardage, au classement, à l'enfournement, au défournement, au triage et la mise en sac. La cuisson se fait sur un trépied en argile ou sur trois pierres ayant une efficacité thermique de l'ordre de 8 à 13 %, un rendement à la carbonisation qui est d'environ 18 %...



### *2.1.8.2.3. Feux de brousse*

Chaque année, en saison sèche, les feux de brousse souvent mis volontairement pour la chasse ou consécutives aux activités anthropiques consomment la plupart des formations savanicoles et les galeries forestières (Figure 7). Ils mettent ainsi en péril les habitats des espèces qui y sont inféodées ainsi que les microorganismes du sol. Ces feux constituent le 1<sup>e</sup> facteur de la dégradation du couvert végétal et de la perte de la diversité biologique.



*Figure 7. Vue d'un feu de brousse sauvage*

### *2.1.8.2.4. Envahissement et infiltration de la réserve*

L'accroissement de la densité de la population a largement influencé l'occupation du sol de Bombo-lumene. Cette causalité négative entre la population et les ressources forestières a eu pour conséquence outre l'intensification de l'agriculture ; l'abattage massif de la faune et la coupe anarchique des essences ligneuses.

## **2.1.9. Sites d'échantillonnage**

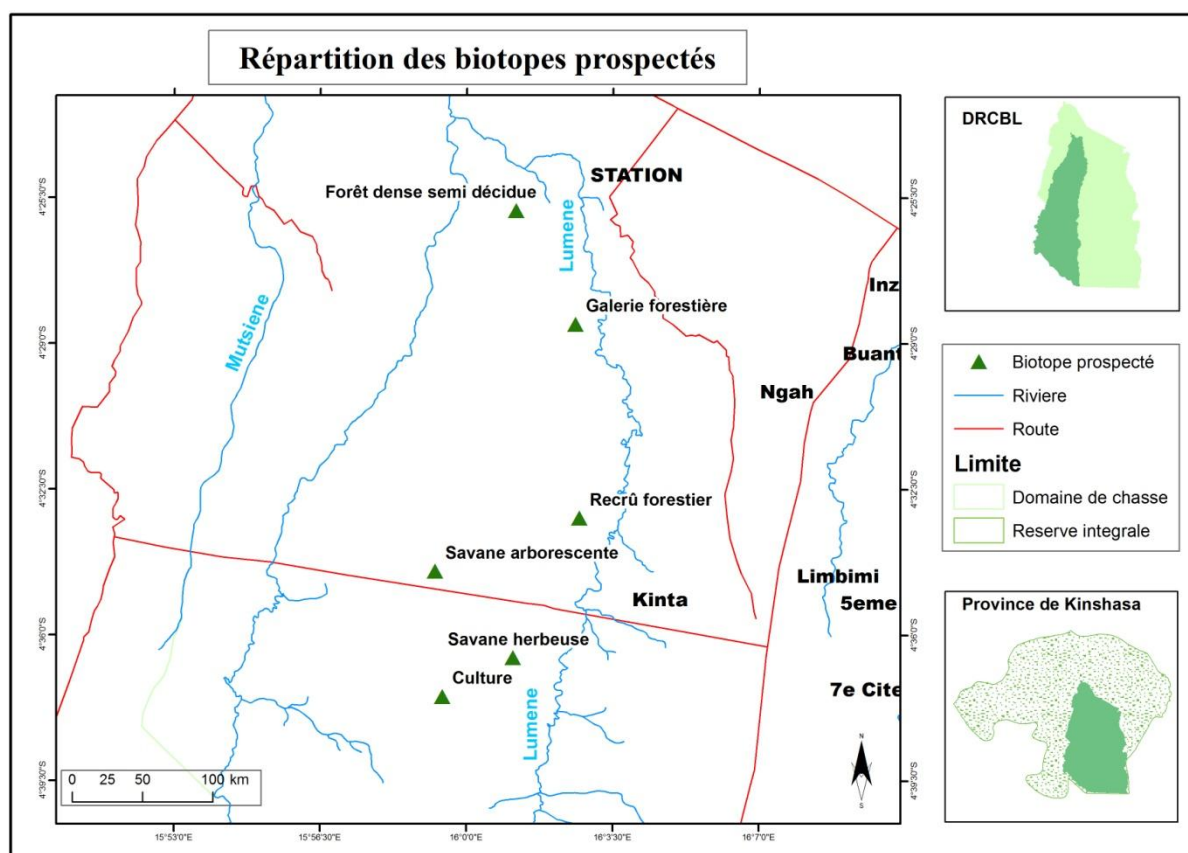
Six types de biotopes (Figure 8) ont été sélectionnés comme sites d'étude à savoir :

- les forêts denses semi décidues (FD),
- les galeries forestières (GF),
- les recrûs forestiers (RF),
- les savanes arborescentes ou formations herbeuses hautes (SA),
- les savanes herbeuses ou formations herbeuses basses) (SH)
- les sols sous culture (SSC).

Leur choix a été basé selon un gradient d'intensification des activités humaines, afin de toucher les différents faciès du couvert végétal. Il permet de mieux cerner la diversité des communautés de vers de terre dans cette Réserve à caractères très diversifiés. Le tableau 3 reprend les caractéristiques générales des sols (température, humidité et pH) de chaque biotope.

**Tableau 3. Caractéristiques générales des sols des sites étudiés : les humidités, les températures et les pH correspondent aux mesures moyennes calculées durant toute la période de l'échantillonnage**

Biotopes	Température (°C)	Humidité (%)	pH
Forêt dense semi décidue	20,00	33,89	6,71
Galerie forestière	21,07	29,71	5,83
Recrû forestier	23,03	16,53	4,61
Savane arborescente	24,17	11,47	4,52
Savane herbeuse	25,06	9,50	3,88
Sol sous culture	26,91	6,45	3,09



**Figure 8. Présentation cartographique des biotopes échantillonnés**

## 2.2. Méthodes de prélèvement

### 2.2.1. Méthodes d'extraction chimique des lombriciens dans le sol

L'extraction des lombriciens a été effectuée selon la méthode décrite par Bouché (1972) et adaptée par Cluzeau *et al.* (1999) qui associe les méthodes chimiques et le tri manuel. Elle est basée sur la réaction des vers de terre vis-à-vis de la substance toxique répandue à la surface pour éviter l'irritation cutanée ; ils sortent alors du sol par l'ouverture de leur galerie (Figure 9). Cette extraction chimique a été réalisée sur 1 m<sup>2</sup> après un triple épandage de dix litres d'une solution de formaldéhyde à 4 %. La surface prélevée est balisée par un cadre métallique de 1 m<sup>2</sup> (la végétation y est tondue à raz si besoin). Si la surface est recouverte de litière ou de mousse, l'horizon de surface est prélevé et trié séparément. Cette méthode est bien adaptée aux milieux hétérogènes où la densité des lombriciens est supposée être différente et la taille de la surface du prélèvement suffisante pour intégrer à la fois la variabilité de distribution des lombriciens associée à cette hétérogénéité naturelle du milieu et leur faible densité. Elle a été complétée par un tri manuel appliqué sur un volume de 0,02 m<sup>3</sup> de sol (0,10 m<sup>2</sup> x 0,2 m de profondeur).

A chaque fois, trois répétitions ont été réalisées sur chaque type de biotope étudié. La présence de turricules a servi d'indicateur pour le choix des parcelles.



Figure 9. Ver de terre (*Dichogaster tenuiseta*) extrait par la méthode chimique

### 2.2.2. Méthodes d'échantillonnage du sol, des turricules et de prélèvement des vers de terre dans les bois en décomposition

Dans chaque biotope, une parcelle expérimentale d'environ 3 m x 3 m a été mise en place (Figure 10). Elle a été subdivisée en 3 bandes (a, b et c) dans lesquelles ont été positionnées des cadrats de 1 m<sup>2</sup>. Dans chaque bande, les sols de chaque cadrat choisi au hasard ont été échantillonnés et les prélèvements ont été mélangés afin de faire un échantillon moyen ; au total, on dispose ainsi de 3 échantillons moyens (1 par bande) par parcelle sélectionnée. Les sols ont été prélevés à la tarière. Les turricules ont été récoltés dans ces cadrats dans lesquels avaient été déposés les morceaux de bois de *Pentaclethra eetveldeana* De Wild., *Dracaena mannii* Welw., *Hymenocardia acida* Tul. et *Dialium englerianum* Henriq d'environ 30 cm de longueur et 1 kg de masse.

Dans chaque morceau de bois les lombriciens ont été prélevé à l'aide d'une pince fine. Les placeaux ont été visité mensuellement pendant 2 années. Cette technique a présenté l'avantage de stimuler la dégradation du bois du fait de son contact direct avec le sol. Elle est la plus utilisée et de surcroît recommandée par l'UNESCO pour des observations en zone tropicale (Dikumbwa, 1990).

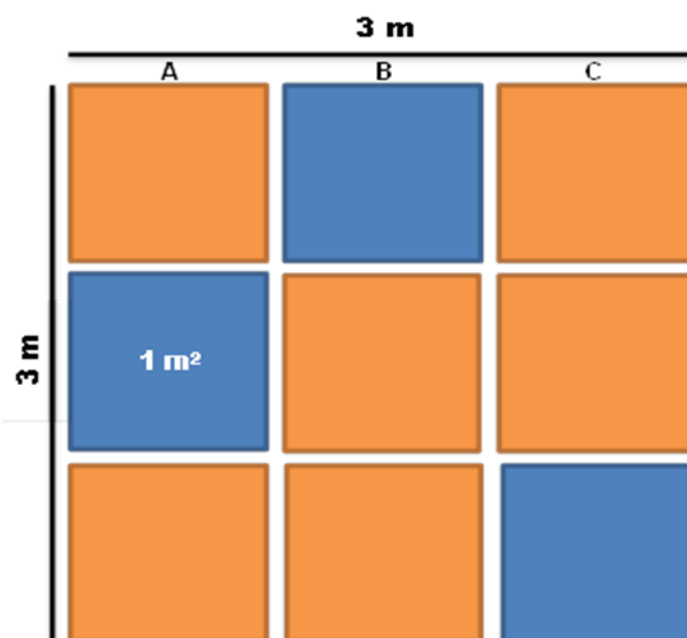


Figure 10. Dispositif d'échantillonnage des lombriciens et des sols

## **2.3. Méthodes de conservation**

Les lombriciens tués dans l'alcool puis nettoyés, ont ensuite été placés dans des piluliers préalablement étiquetés, contenant une solution de formol à 4%. L'alcool a été remplacé pendant deux jours successifs pour éviter que l'eau et le mucus visqueux que sécrètent les lombriciens le diluent.

## **2.4. Méthodes d'identification**

### **2.4.1. Méthodes d'identification de taxa lombriciens**

Dans cette étude, les lombriciens ont été identifiés suivant les clés préconisées par Csuzdi (2010). Ces dernières sont basées sur des caractéristiques morphologiques et anatomiques (la forme du Prostomium, la forme du clitelium, la taille de l'individu, la couleur du corps, le nombre des pores mâles et femelles, le nombre des pores dorsaux...). Cette identification a été réalisée au laboratoire de l'Unité d'Entomologie Fonctionnelle et Evolutive de Gembloux agrobiotech, Université de Liège.

### **2.4.2. Méthodes d'identification des catégories écologiques**

Les lombriciens ont été ainsi identifiées jusqu'à l'ordre suivant la méthode Rapid Biodiversity Assessment (RBA), les niveaux inférieurs (famille, genre, espèce) ne sont pas pris en compte (Porte, 2011). A partir des ordres, les individus ont été regroupés suivant leur appartenance aux structures écologiques : épigés, endogés et anéciques Bouché (1972).

## **2.5. Méthodes d'analyse des sols et des turricules**

Dans chaque parcelle d'échantillonnage définie, une fosse pédologique a été creusée, les échantillons des sols ont été prélevés et les turricules présents ont été récoltés et soumis à des analyses physico-chimiques classiques, dans l'objectif ultérieur de corrélérer ces données avec les données des lombriciens. Ces analyses effectuées au laboratoire ont servis à la détermination de :

- la teneur en Carbone organique
- la teneur en Azote organique
- la teneur en Cuivre,
- la teneur en Magnésium,

- la teneur en zinc,
- l'humidité du sol,
- le pH du sol,
- la température du sol.

Les échantillons ont été analysés au laboratoire du système sol-eau de Gembloux agrobiotech, Université de Liège et au laboratoire de Pédologie et Physique du Sol du Centre de Recherche pour l'Energie Nucléaire de Kinshasa (CREN-K) suivant la méthode standard recommandée par le programme TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) (Anderson & Ingram, 1993).

## **2.6. Méthodes d'analyse des données**

### **2.6.1. Analyse statistique**

Toutes les données analysées avaient été préalablement soumises au test de Shapiro-Wilk (W) afin de vérifier si elles suivent une loi normale ou non. Ce test permet de déterminer le type d'analyse à effectuer. Les densités relatives des lombriciens sont analysées successivement à trois niveaux :

#### **2.6.1.1. Analyse de la variance (ANOVA)**

C'est une extension du test de comparaison des moyennes, elle s'intéresse à plus de deux groupes indépendants. Les écarts de la variance à la moyenne des populations étudiées ont permis d'évaluer la pertinence de la séparation.

L'effet de l'utilisation et de l'occupation du sol sur les densités lombriciennes a été testé par une ANOVA à un facteur. Les ANOVAs qui se révélaient significatives au seuil de  $p < 0,05$  étaient complétées par un test post hoc de Fisher. Des lettres a, b et c,... ont été attribuées dans la présentation des résultats pour marquer les différences dans les facteurs testés.

### 2.6.1.2. Analyses multivariées

Les méthodes d'analyses multivariées ont été utilisées pour confirmer les patrons de classification des populations en accord avec l'ensemble des caractéristiques évaluées. L'analyse en composantes principales (ACP) permet de visualiser des données quantitatives, l'analyse factorielle des correspondances (AFC), quant à elle, elle permet de mettre en évidence des données qualitatives. Les données de cette étude étant qualitatives, on a donc utilisé une analyse factorielle des correspondances. Elle est utilisée à titre exploratoire en tant que technique d'analyse multidimensionnelle descriptive, elle vise à résumer l'information contenue dans un ensemble de variables selon un certain nombre d'axes factoriels correspondant à des combinaisons linéaires des variables initiales. L'objectif est de maximiser le pourcentage de variance de l'information initiale prise en compte par les axes factoriels. Cette analyse a permis d'établir le lien entre les espèces lombriciennes et les biotopes qui les inféodent (Lebreton *et al.*, 1988).

Une Analyse Canonique des Correspondances (ACC) a été réalisée pour détecter les regroupements éventuels des espèces recensées dans les biotopes d'étude ayant un comportement similaire par rapport à l'ensemble des variables lombriciennes et édaphiques à la fois.

### 2.6.1.3. Evaluation des corrélations

L'analyse du degré d'association entre les différentes variables, a été évaluée à travers le calcul du coefficient de corrélation de Bravais Person au seuil de signification de 5%, à partir de la matrice de données. Ce coefficient permet de mesurer l'intensité de la liaison entre deux variables. C'est donc un paramètre important dans l'analyse des régressions linéaires (simples ou multiples). En revanche, ce coefficient est nul ( $r = 0$ ) lorsqu'il n'y a pas de relation linéaire entre les variables (ce qui n'exclut pas l'existence d'une relation autre que linéaire). Par ailleurs, le coefficient est de signe positif si la relation est positive (directe, croissante) et de signe négatif si la relation est négative (inverse, décroissante).

## 2.6.2. Utilisation des descripteurs écologiques

### 2.6.2.1. Richesse spécifique (Taxonomique)

La Richesse spécifique de chaque biotope a été déterminée par le nombre total de taxa que comporte la communauté considérée dans un biotope.

L'indice de similarité de Jaccard ( $C_j$ ) a permis d'évaluer la variabilité de la composition taxonomique des biotopes. Cet indice a été calculé avec les données de présence/absence par l'équation 1.

Équation 1. Indice de similarité de Jaccard

$$C_j = \frac{J}{(a + b - J)}$$

a = la richesse dans le premier biotope,

b = la richesse dans le deuxième biotope

j = espèce partagée

### 2.6.2.2. Diversité spécifique

L'analyse de la diversité a été réalisée par le calcul d'indices de diversité et d'équitabilité. La diversité a été appréciée par l'indice de Shannon (1948) calculé par l'équation 2.

Équation 2. Indice de diversité de Shannon

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i (\log_2 p_i)$$

H' = Shannon / Wiener (Indice de Diversité)

p<sub>i</sub> = proportion par espèce i allant de 1 à S

L'équitabilité a été appréciée par l'indice de Piélou (Llyod & Ghelardi, 1964), calculé par l'équation 3.

Équation 3. Indice d'équitabilité de Piélou

$$E = \frac{H'}{H'_{\max}}$$



Équation 4. Indice de diversité de Shannon (maximal)

$$H'_{\max} = \frac{H'}{\ln S}$$

$H'$  = indice diversité de Shannon

$H'_{\max} = \ln S$

$E = H' / \ln S$

$H_{\max}$  = diversité au cas d'équitabilité maximale

$S$  = nombre d'espèces

$E$  = (varie entre 0 – 1)

### 2.6.3. Logiciels utilisés

Les logiciels R (R Development Core Team, 2014) et le complément Xlstat 2014 ont permis d'effectuer les analyses statistiques. Le logiciel Past 3.1 (Hammer *et al.*, 2001) a servi au calcul des descripteurs écologiques, les cartes ont été élaboré à l'aide du logiciel Arc Gis 10 tandis que le logiciel Origin 6.1 a servi à la représentation graphique des résultats.

## Chapitre 3. Résultats

### 3.1. Inventaire et diversité taxonomique des communautés lombriciennes

#### 3.1.1. Richesse taxonomique et distribution des taxa

Au total, 10 espèces de vers de terre ont été recensées (identifiées) dans l'ensemble des biotopes investigués, appartenant à 2 familles dont Acanthodrilidae (*Dichogaster wenkei*, *D. tenuiseta*, *D. navana*, *D. savanicola*, *D. silvestris*, *D. stuhlmani*, *D. austeni*, *D. congica* et *Benhamia itoliensis*) et Eudrilidae (*Hyperiodrilus africanus*) (Tableau 4).

*Tableau 4. Composition de la richesse taxonomique des différents biotopes*

Familles	Taxa	FD	GF	RF	SA	SH	CU
Eudrilidae	<i>H. africanus</i>	0	0	29	17	0	0
Acanthodrilidae	<i>B. itoliensis</i>	0	46	0	0	10	0
Acanthodrilidae	<i>D. wenkei</i>	74	52	0	0	0	0
Acanthodrilidae	<i>D. tenuiseta</i>	46	0	0	0	0	0
Acanthodrilidae	<i>D. navana</i>	0	55	32	0	0	0
Acanthodrilidae	<i>D. savanicola</i>	0	0	12	54	37	21
Acanthodrilidae	<i>D. silvestris</i>	94	49	0	0	0	0
Acanthodrilidae	<i>D. stuhlmani</i>	44	36	38	0	0	0
Acanthodrilidae	<i>D. austeni</i>	47	48	39	0	0	0
Acanthodrilidae	<i>D. congica</i>	80	45	0	38	29	27
Total de taxa		6	7	5	3	3	2

Ces espèces sont en majorité endémiques de la RDC exceptées *H. africanus* et *B. itoliensis*. La comparaison de cette richesse spécifique entre tous les biotopes présente de grandes variabilités. 7 espèces ont été rencontrées dans la galerie forestière et 6 dans la forêt dense semi décidue. Le recrû forestier est associé à une richesse de 5 espèces. 3 espèces ont été identifiées concomitamment dans la savane arborescente et herbeuse ; 2 espèces ont été identifiées dans le sol sous culture.

Il apparaît intéressant de noter qu'en fonction du niveau d'intégration considéré, les différences apparaissent fortement au niveau de chaque biotope. Ce qui signifie que les vers colonisent les biotopes où les conditions écologiques sont les plus favorables à leur survie. Les causes peuvent être multiples, d'une part, du fait que toutes les espèces ne s'adaptent pas de la même manière dans les différentes niches écologiques à cause des facteurs édaphiques, la texture et l'humidité du sol, et d'autre part à cause des agressions multiples comme l'effet des prédateurs et parasites des vers. En effet, dans la galerie forestière et dans la forêt dense semi décidue, les conditions sont très favorables au développement et à la dispersion des vers de terre ce qui justifie leur diversité.

Certains taxa présentent une large distribution et ne pourront donc être caractéristiques d'un biotope particulier. D'autres taxa au contraire présentent des distributions plus limitées. Ces taxa pourront être caractéristiques des conditions édaphoclimatiques ou des usages du sol. Ainsi en comparant la composition taxonomique des biotopes, les taxa peuvent être regroupés en trois groupes (Tableau 5) à savoir :

- les taxa inféodés (constants) aux conditions d'un milieu et qui ne sont donc observés strictement que dans un milieu ;
- les taxa sensibles (fidèles) aux conditions d'un milieu et qui sont observés préférentiellement sur un des 2 ou 3 biotopes.
- les taxa ubiquistes qui sont observés sur plus de 3 biotopes.

**Tableau 5. Présentation des taxa inféodés, sensibles et ubiquistes aux différents biotopes**

Taxa inféodés	Taxa sensibles	Taxa ubiquistes
<i>Dichogaster tenuiseta</i>	<i>Hyperiodrilus africanus</i>	<i>Dichogaster congica</i>
	<i>Benhamia itoliensis</i>	<i>Dichogaster savanicola</i>
	<i>Dichogaster wenkei</i>	
	<i>Dichogaster austeni</i>	
	<i>Dichogaster navana</i>	
	<i>Dichogaster silvestris</i>	
	<i>Dichogaster stuhlmanni</i>	

Sur les 10 espèces recensées, 7 ont été considérées comme des espèces sensibles notamment: *H. africanus*, *B. itoliensis*, *D. wenkei*, *D. navana*, *D. silvestris*, *D. stuhlmanni*, *D. silvestris* ; 2 espèces considérées comme ubiquistes *D. congica* et *D. savanicola* sont retrouvées dans la

plupart des biotopes ; elles possèdent donc une niche plus large et démontrent une certaine capacité d'adaptation aux différentes conditions environnementales. Par contre, l'espèce *D. tenuiseta* semble principalement inféodée à la forêt dense semi décidue ce qui signifie qu'elle possède donc une niche écologique restreinte.

Afin d'apprécier l'effet des biotopes sur la richesse taxonomique des lombriciens, leur caractérisation a été effectuée en tenant compte des caractéristiques morphologiques, du régime alimentaire associé et du biotope de prélèvement.

#### 3.1.1.1. Famille Eudrilidae (Claus, 1880)

Une seule espèce a été identifiée

##### 3.1.1.1.1. *Hyperiodrilus africanus* (Beddard, 1891)

Récoltée dans le recrû forestier et la savane arborescente, cette espèce à prostomium prolobique est géophage. Elle est décrite en Côte d'Ivoire. Elle est rencontrée en RDC et considérée comme spécifique de l'Afrique tropicale: Angola, Cameroun, Côte d'Ivoire, Ghana, Nigeria, Togo et R DC (Omodéo, 1954).

#### 3.1.1.2. Famille des Acanthodrilidae (Claus, 1880)

Pour cette famille, 9 espèces de lombriciens ont été identifiées.

##### 3.1.1.2.1. *Benhamia itoliensis* (Michaelsen, 1892)

Récoltée dans la galerie forestière et dans la savane herbeuse, cette espèce géophage présente un prostomium prolobique. Elle est décrite au parc national de l'Upemba et répandue dans toutes les provinces de la RDC. Cette espèce est aussi signalée en Afrique centrale et en Afrique du sud.

##### 3.1.1.2.2. *Dichogaster wenkei* (Michaelsen, 1931)

Récoltée dans la forêt dense semi décidue, dans la galerie forestière et dans le bois en décomposition, cette espèce présente un prostomium schizolobique et est phytosaprophage. Elle est décrite en RDC au parc national de l'Upemba et a une distribution dans toutes les provinces du pays.

#### 3.1.1.2.3. *Dichogaster tenuiseta* (Michaelsen, 1936)

Récoltée dans la forêt dense semi décidue et dans le bois en décomposition, cette espèce à prostomium épilobique est phytosaprophage. Elle est déterminée en RDC au parc de l'Upemba et répandu dans toutes les provinces du pays.

#### 3.1.1.2.4. *Dichogaster navana* (Michaelsen, 1936)

Récoltée dans la galerie forestière et dans le recrû forestier, cette espèce présente un prostomium schizolobique et est géophage. Elle est rencontrée uniquement en RDC.

#### 3.1.1.2.5. *Dichogaster savanicola* (Michaelsen, 1915)

Récoltée dans le recrû forestier, dans la savane arborescente et herbeuse et sous les cultures de manioc, cette espèce est caractérisée par un prostomium prolobique et est géophage. Elle est décrite dans les savanes du parc national de l'Upemba et rencontrée dans toutes les savanes du pays.

#### 3.1.1.2.6. *Dichogaster silvestris* (Michaelsen, 1896)

Récoltée dans la forêt dense semi décidue et dans la galerie forestière, cette espèce présente un prostomium épilobique et est géophage. Elle est décrite dans les provinces du Kivu et dans la province du Kongo-Central. Sa distribution couvre toutes les provinces de la RDC.

#### 3.1.1.2.7. *Dichogaster stuhlmanni* (Michaelsen, 1890)

Récoltée dans la forêt dense semi décidue, dans la galerie forestière et dans le recrû forestier. Cette espèce à prostomium épilobique est géophage. Elle est décrite en RDC dans les forêts du parc national de l'Upemba et rencontrée dans la plupart des provinces du pays.

#### 3.1.1.2.8. *Dichogaster austeni* (Beddard, 1901)

Récoltée dans la forêt dense semi décidue, dans la galerie forestière, dans le recrû forestier et dans les bois en décomposition, cette espèce présente un prostomium épilobique et est phytosaprophage. Elle est décrite dans la province du sud Kivu en RDC. Elle est aussi rencontrée dans toutes les provinces du pays.

### 3.1.1.2.9. *Dichogaster congica* (Horst, 1894)

Récoltée dans la forêt dense semi décidue, dans la galerie forestière, dans la savane arborescente et herbeuse ainsi que sous les cultures. Cette espèce présentant un prostomium prolobique est géophage. Elle est décrite en RDC et est très largement répandue dans les sols de toutes les provinces du pays.

## 3.1.2. Caractérisation des communautés

### 3.1.2.1. Densités lombriciennes

Les résultats obtenus sur les densités des communautés de vers de terre ont montré des différences significatives entre les biotopes étudiés ( $p < 0,001$ ) (Figure 11).

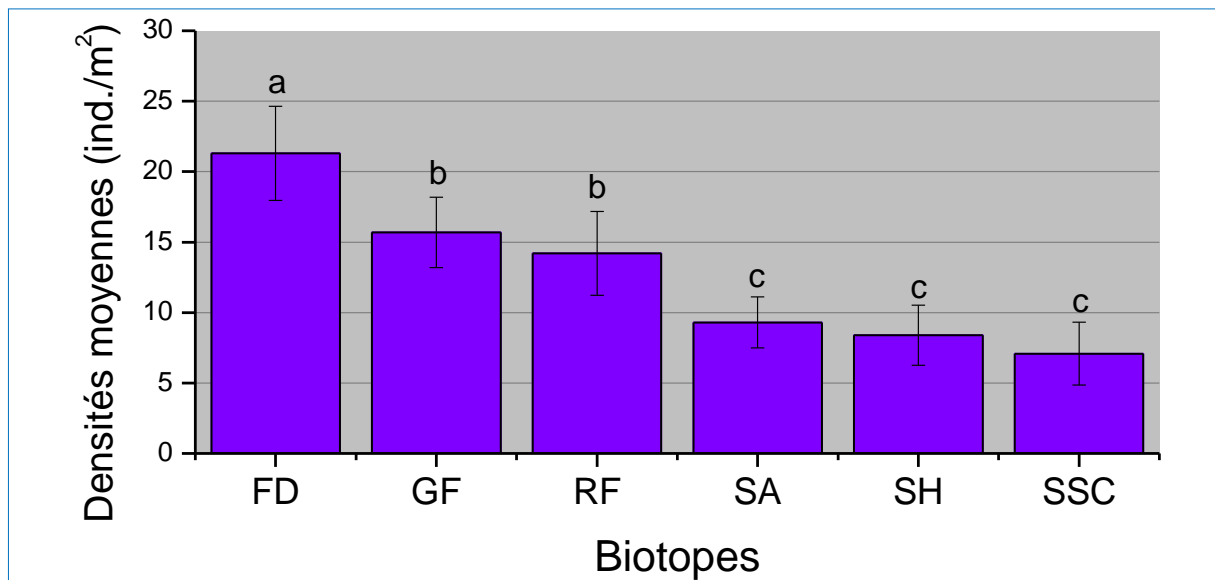


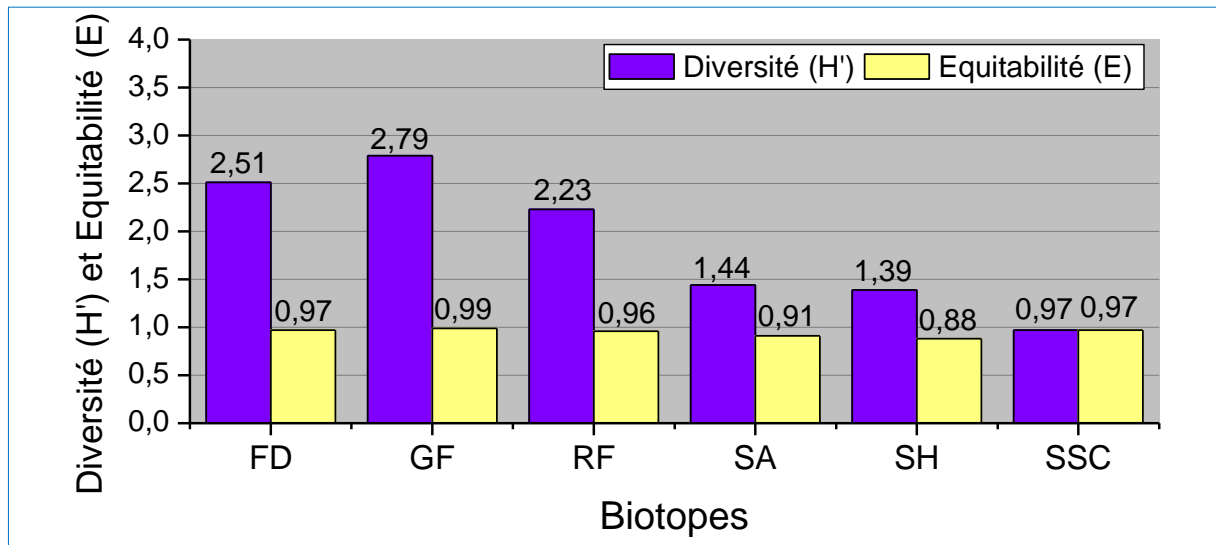
Figure 11. Variabilité de la densité lombricienne mesurée dans les biotopes [Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $p < 0,05$ ) d'après le test de Fisher LSD].

La forêt dense semi décidue abrite des plus importantes abondances lombriciennes que tous les autres biotopes. Cependant, ces abondances n'ont pas révélé de différences significatives d'une part entre la galerie forestière et le recrû forestier et d'autre part entre la savane arborescente, la savane herbeuse et le sol sous culture. Ce qui signifie que la population de vers de terre varie selon les types de biotopes, mais aussi selon les pratiques agricoles adoptées. Elle dépend de l'abondance et de la source de la nourriture.

Ces résultats sont liés en premier lieu aux conditions microclimatiques qui dirigent fortement la présence des communautés lombriciennes dans les différents biotopes.

### 3.1.2.2. Diversité spécifique des biotopes

L'indice de diversité de Shannon suit presque la même tendance que la richesse spécifique (Figure 12).



*Figure 12. Indices de diversité mesurés dans les différents biotopes*

Les valeurs les plus élevées ont été observées dans la galerie forestière et la forêt dense semi décidue avec respectivement  $H' = 2,79$  et  $H' = 2,51$  ; la plus faible valeur avait été observée dans le sol sous culture ( $H' = 0,97$ ).

L'équitabilité varie faiblement, la valeur la plus élevée a été observée dans la galerie forestière ( $E = 0,99$ ). La savane herbeuse avec  $E = 0,88$  et paraît comme le biotope le moins équilibré. Cela démontre que les perturbations environnementales se traduisent par une baisse de l'indice de diversité et d'équitabilité et que les conditions environnementales sont relativement distinctes entre les biotopes.

### 3.1.2.3. Similarité taxonomique

La similarité taxonomique entre biotopes qui reflète le nombre d'espèces communes, est présentée au tableau 6.

**Tableau 6. Matrice de similarité (indice de Jaccard) appliquée aux taxons non rares entre les biotopes**

	FD	GF	RF	SA	SH	SSC
FD	1,00					
GF	0,63	1,00				
RF	0,25	0,38	1,00			
SA	0,13	0,11	0,17	1,00		
SH	0,13	0,25	0,17	0,50	1,00	
SSC	0,14	0,14	0,20	0,67	0,67	1,00

On y remarque que la savane herbeuse, la savane arborescente et le sol sous culture sont les habitats les plus proches. Ils présentent un indice de Jaccard égal à 0,67 et sont suivi de la forêt dense semi décidue et la galerie forestière qui ont un indice de similarité égal à 0,63. Les autres biotopes sont les plus distants. Ils présentent un indice de Jaccard relativement faible. Ces habitats accueilleraient une diversité relativement différente entre eux.

### 3.1.2.4. Relations entre la diversité lombricienne et les biotopes étudiés par l'analyse Factorielle des Correspondances

Après la description des structures taxonomiques des communautés dans les différents biotopes, l'analyse factorielle de correspondance (AFC) a mis en évidence des facteurs explicatifs de ces distributions permettant d'une part d'extraire des taxa caractéristiques de chaque biotope et d'autre part de comprendre l'adaptabilité de ces communautés aux conditions pédoclimatiques variées régissant les biotopes.

Cette analyse basée sur la densité relative de chaque espèce dans les différents biotopes apporte une réponse plus nette aux observations faites sur la distribution des espèces. La matrice de départ, issue de la matrice de données espèces de ver de terre X biotopes est une matrice de données de 10 lignes et 6 colonnes représentant respectivement les espèces de ver



de terre et les biotopes. Le tableau 7 présente les données standardisées par le nombre total de chaque espèce récoltée dans les différents biotopes.

**Tableau 7. Matrice des données standardisées des densités relatives des taxa**

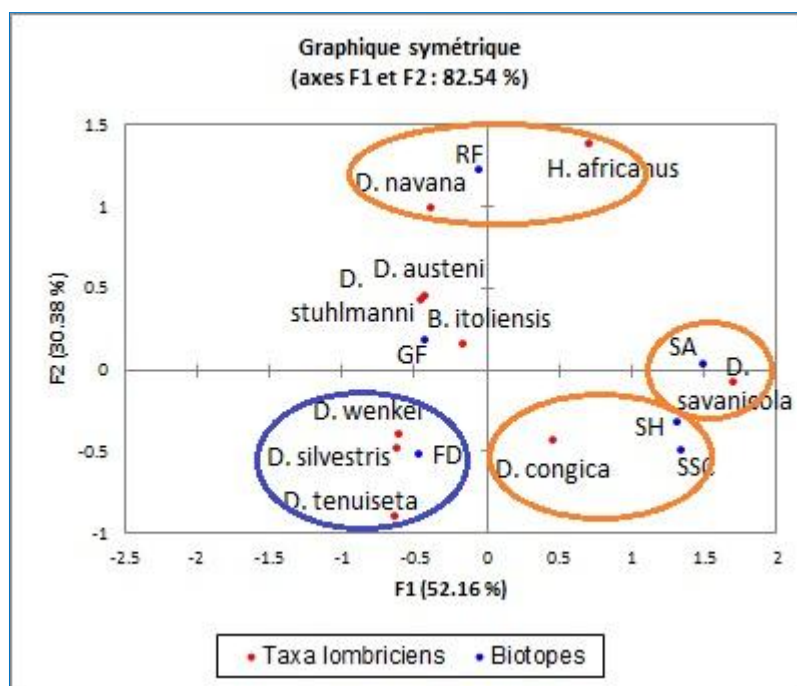
Taxa	FD	GF	RF	SA	SH	SSC
<i>Hyperiodrilus africanus</i>	0,00	0,00	0,64	0,36	0,00	0,00
<i>Benhamia itoliensis</i>	0,00	0,83	0,00	0,00	0,17	0,00
<i>Dichogaster wenkei</i>	0,59	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Dichogaster tenuiseta</i>	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Dichogaster navana</i>	0,00	0,63	0,37	0,00	0,00	0,00
<i>Dichogaster savanicola</i>	0,00	0,00	0,10	0,44	0,30	0,17
<i>Dichogaster silvestris</i>	0,66	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Dichogaster stuhlmanni</i>	0,38	0,30	0,32	0,00	0,00	0,00
<i>Dichogaster austeni</i>	0,35	0,36	0,29	0,00	0,00	0,00
<i>Dichogaster congica</i>	0,37	0,21	0,00	0,17	0,13	0,12

Les valeurs propres (Tableau 8) montrent que le premier axe factoriel seul explique 52,16 % de l'information de la variabilité des données, avec le deuxième axe, le jeu de la variabilité est de 82,54 % de la variance totale de l'échantillon ce qui est suffisant du point de vue interprétation des données.

**Tableau 8. Contributions des variables dans la définition des axes factoriels**

Axes	Valeurs propres	Inertie (%)	% cumulé
F1	0,555	52,159	52,159
F2	0,323	30,380	82,539
F3	0,165	15,499	98,037
F4	0,013	1,206	99,243
F5	0,008	0,757	100,000

Seuls les deux premiers axes constitués sont interprétés. Ils expriment 82,54 % de la variance de l'échantillon (Figure 13).



**Figure 13. Projection de la corrélation entre les taxa lombriciens et les biotopes dans l'espace défini par les deux axes factoriels**

L'axe 1 sépare clairement deux groupes. Le premier est composé de *D. congica*, essentiellement corrélée la savane herbeuse et le sol sous culture ; le deuxième groupe isole *D. savanicola*, associée à la savane arborescente. L'axe 2 révèle d'une part, une corrélation entre *H. africanus* et *D. navana* et le recrû forestier du côté positif, et d'autre part, une corrélation entre *D. wenkei*, *D. silvestris*, *D. tenuiseta* et la forêt dense semi décidue. Cela signifie que *D. silvestris*, *D. tenuiseta* et *D. wenkei* côtoient les biotopes à la fois plus riches en matière organique et plus équilibrés contrairement au taxon *D. savanicola* qui ne montre pas une forte tendance vers les teneurs élevées en matière organique et en argile, colonisant de ce fait préférentiellement la savane, tandis que le taxons *H. africanus* et *D. navana* peuvent supporter des habitats qui se reconstituent après des fortes perturbations et dont les substrats sont moins riches en matière organique. Quant au taxon *D. congica*, il est plus lié aux biotopes très perturbés et pauvres en matière organique.

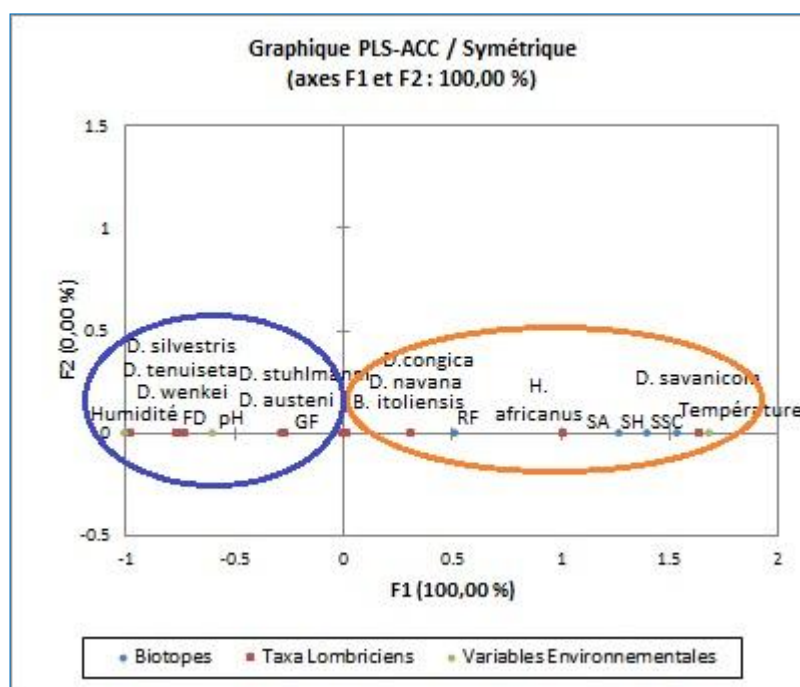
### 3.1.2.5. Effets des variables édaphiques sur la diversité lombricienne par l'Analyse Canonique des Correspondances (ACC)

L'analyse des valeurs propres de l'ACC (Tableau 9) montre que toute l'inertie est représentée par le premier axe canonique (100 %). Cela signifie que la représentation de l'ACC en deux dimensions est suffisante pour analyser les relations entre les espèces lombriciennes et les variables édaphiques.

*Tableau 9. Contributions des variables dans la définition des axes canoniques*

Axes	Valeurs propres	Inertie non-contrainte (%)	% cumulé	Inertie totale	% cumulé (%)
F1	0,606	100,000	100,000	44,895	44,895

Le graphique de l'ACC (Figure 14) indique une corrélation significative entre les taxa lombriciens et les facteurs environnementaux (variables explicatives).



*Figure 14. Projection de la corrélation entre les taxa lombriciens et les variables dans l'espace défini par les deux axes canoniques*

La représentation graphique de l'ACC permet de visualiser simultanément les espèces et les variables édaphiques. Elle indique que l'axe canonique F1 est positivement corrélé aux espèces *D. congica*, *D. navana*, *D. savanicola*, *B. itoliensis* et *H. africanus* ainsi qu'à la température (variable explicative). Il est négativement corrélé aux taxons *D. silvestris*, *D. tenuiseta*, *D. stuhlmanni*, *D. austeni* et *D. wenkei* ainsi qu'à l'humidité et au potentiel d'hydrogène (Variables explicatives). Cela veut dire que *D. congica*, *D. navana*, *D. savanicola*, *B. itoliensis* et *H. africanus* peuvent supporter une température du sol légèrement élevée et côtoyer des substrats au pH acide. Par contre, les espèces *D. silvestris*, *D. tenuiseta*, *D. stuhlmanni*, *D. austeni* et *D. wenkei* montrent des tendances vers les teneurs élevées en humidité du sol et des pH moins acides.

### 3.1.3. Discussion

Cette étude a montré la diversité des communautés lombriciennes présentes dans les biotopes naturels et anthropisés, diversité illustrée tant par les milieux habités, la forme du prostomium que par le régime alimentaire (géophage, phytosaprophage).

La diversité est importante avec 10 taxa dont 8 sont endémiques et distribués à l'échelle de toute la RDC (*D. wenkei*, *D. tenuiseta*, *D. navana*, *D. savanicola*, *D. silvestris*, *D. stuhlmanni*, *D. austeni*, *D. congica*) et 2 sont répertoriés aussi dans les régions voisines du pays (*H. africanus*, *B. itoliensis*). Cette diversité proviendrait, d'une part, de divers facteurs climatiques, de la nature du sol et de la variabilité des biotopes et d'autre part, de la dépendance écologique de différents taxa vis-à-vis de leurs biotopes. Ces résultats corroborent les travaux d'Ouahrani (2003) qui a recensé 11 espèces dans le Constantinois algérien. La collection de Baha (1997) dans la zone de la Mitidja, une plaine côtière au sud d'Alger, a révélé 11 espèces aussi. Par contre Omodeo *et al.* (2003) estiment que la biodiversité lombricienne est faible sur l'ensemble du territoire maghrébin (Maroc, Algérie et Tunisie), où ils ont signalé cependant 33 espèces, dont 24 en Algérie. A Madagascar, en raison de son insularité, 33 espèces dont 20 exotiques et 13 endémiques y ont été également répertoriées par Razafindrakoto (2012).

La galerie forestière et la forêt dense semi décidue abritent les plus importantes diversités et équitabilités taxonomiques que le recrû forestier, les savanes et le sol sous culture. Il est évident que cette abondance est due au fait que les écosystèmes forestiers naturels favorisent un bon développement des lombriciens que les écosystèmes anthropisés.

L'effet négatif de l'anthropisation sur les lombriciens est un fait largement souligné dans la littérature. Cette réduction des communautés lombriciennes sous l'effet d'une intensification agricole est observée aussi bien en milieu tempéré qu'en milieu tropical (Edwards & Lofty, 1977 ; Lee, 1985 ; Decaëns, 1999). Fragoso *et al.* (1997) ont par ailleurs signalé que la biodiversité des vers de terre est modifiée par la destruction du couvert végétal et les habitats naturels et leurs remplacement par les cultures et les agroécosystèmes ; ce qui réduit la richesse spécifique, le nombre d'espèces indigènes ainsi que le nombre de groupes écologiques.

Par ailleurs, l'AFC a mis en évidence la présence caractéristique de certaines espèces lombriciennes dans les biotopes. Ces taxa peuvent dès lors être considérés comme des indicateurs du contexte pédoclimatique. Ainsi, dans la RDCBL les communautés présentes dans la forêt dense semi décidue sont caractérisés par la présence exclusive de *D. silvestris*, *D. tenuiseta* et *D. wenkei*. Les communautés des vers identifiées dans la savane arborescente ont été caractérisées par la présence exclusive de *D. savanicola*. L'espèce *H. africanus* est corrélée au recrû forestier. *D. congica* est étroitement corrélé à la savane herbeuse et au sol sous culture. Compte tenu de leurs faibles densités, l'interprétation de la répartition de *D. stuhlmanni*, *D. austeni*, *D. navana* et *B. itoliensis* est difficile à réaliser. Les fluctuations des conditions microclimatiques et la disponibilité de la matière organique semblent gouverner aussi la répartition et les activités des lombriciens.

Concernant l'ACC, la température s'avère être le paramètre explicatif de la présence des espèces *D. congica*, *D. navana*, *D. savanicola*, *B. itoliensis* et *H. africanus* principalement dans le recrû forestier, la savane arborescente, la savane herbeuse et le sol sous culture. A l'opposé, l'humidité et le pH expliquent la présence des espèces *D. silvestris*, *D. tenuiseta*, *D. stuhlmanni*, *D. austeni* et *D. wenkei* dans la forêt dense semi décidue et dans la galerie forestière. L'humidité et le pH étant hautement corrélés, il est cependant difficile de distinguer leur contribution respective. La littérature a souvent évoqué ces paramètres pour influencer la

distribution des espèces dans les biotopes en favorisant la dominance des certaines espèces au détriment des autres (Lee, 1985).

### **3.1.4. Conclusions**

Les résultats obtenus indiquent que la forêt dense semi décidue, la galerie forestière et la savane arborescente abritent d'abondantes communautés lombriciennes et sont de ce fait les biotopes favorables à leur développement. Concernant la richesse spécifique des lombriciens, il ressort de ces résultats que la galerie forestière et la forêt dense semi décidue sont à la fois les biotopes les plus riches (avec respectivement 7 et 6 espèces) et les plus diversifiés. Ceci justifie l'idée selon laquelle ces biotopes constituent des aires de refuges pour les vers de terre regroupant la majorité d'espèces. La richesse et la diversité spécifique ont également traduit l'importance des biotopes naturels dans le développement des communautés lombriciennes et la dépendance écologique de chaque espèce.

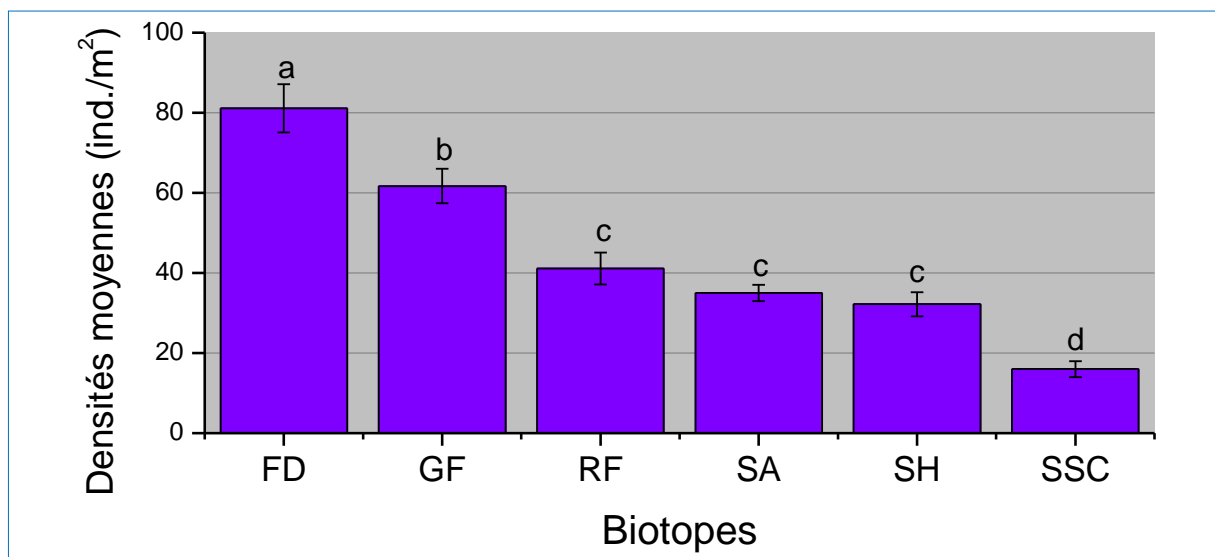
Ces descripteurs écologiques ont décrits des variables caractérisant les affinités d'un taxon (sensibilité/tolérance) pour certaines caractéristiques de l'habitat, comme sa distribution spatiale (à plusieurs échelles d'observation), ses préférences en matière d'habitat ou encore aux principaux paramètres physico-chimiques du sol. De ce fait, les caractéristiques d'un habitat sont considérées comme des filtres pour les traits biologiques et écologiques des espèces. Les traits fonctionnels correspondent alors aux caractéristiques des organismes qui démontrent un lien avec leur fitness (capacité à survivre et se reproduire) (Vandewalle *et al.*, 2010), c'est-à-dire aux traits bioécologiques associés au fonctionnement de l'individu ou associé à son rôle écosystémique. Toutefois, le sol est un milieu complexe où l'interaction entre plusieurs facteurs est non négligeable. Il se pourrait qu'un même facteur édaphique n'ait pas subis les mêmes techniques d'analyse et/ou statistiques influence la dynamique des populations de vers de terre.

## 3.2. Impact des facteurs environnementaux sur la structure des communautés lombriciennes

### 3.2.1. Caractérisation des communautés

#### 3.2.1.1. Densités lombriciennes

Concernant la densité globale, les moyennes fluctuent d'une manière régressive depuis la forêt dense semi décidue vers le sol sous culture. Le test de Fisher est significatif ( $p < 0,001$ ) (Figure 15).

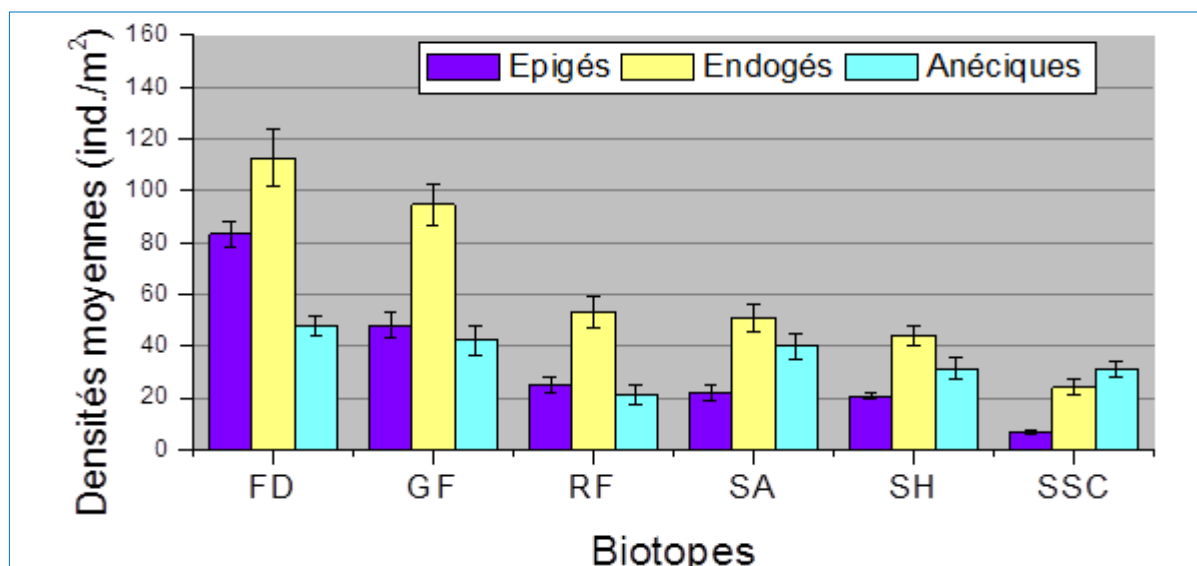


*Figure 15. Variabilité de la densité lombricienne mesurée dans les biotopes [Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $p < 0,05$ ) d'après le test de Fisher LSD]*

La forêt dense semi décidue présente des densités plus importantes que le sol sous culture, la savane herbeuse, la savane arbustive et le recrû forestier. Des densités lombriciennes significativement faibles sont associées au sol sous culture tandis que la galerie forestière renferme une densité intermédiaire. Cela veut dire que les vers de terre évitent les substrats à faibles teneurs de matière organique en faveur de ceux qui en ont les élevées et plus d'humidité.

### 3.2.1.2. Structure écologique des communautés

La variabilité des conditions édaphoclimatiques de différents biotopes influencent significativement la distribution des catégories lombriciennes (Figure 16).



*Figure 16. Evolution de la densité des différentes catégories écologiques des lombriciens mesurée dans les biotopes*

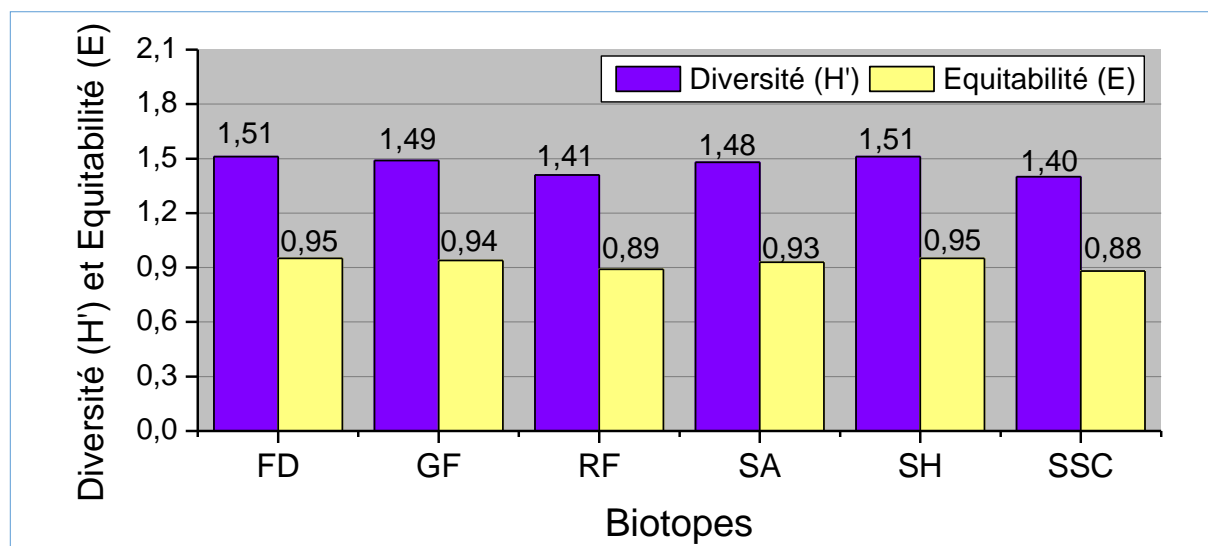
- la forêt dense semi décidue présente une communauté composée en majorité d'endogés et d'épigés (respectivement 113 et 83 individus) ; les anéciques n'y sont représentés que 48 individus.
- la galerie forestière présente une aussi structure similaire à celle de la forêt dense, dominée majoritairement par des espèces endogées (95 individus). Les épigées et les anéciques représentent respectivement 48 et 42 individus.
- la communauté observée dans le recrû forestier est aussi riche en espèces endogées (53 individus), contre 25 individus d'épigés et 21 individus d'anéciques ;
- la communauté de la savane arborescente est principalement composée d'endogés (51 individus), les épigés et les anéciques représentant respectivement 22 et 40 individus ;
- la savane herbeuse présente une communauté dominée par les endogés (44 individus) et les anéciques (32 individus), les épigés n'y sont représentés que par 21 individus ;
- le sol sous culture présente une communauté plutôt dominée par les anéciques (28 individus) et endogés (24 individus) tandis que les épigés ne sont représentés que par 7 individus.



Les espèces anéciques sont aussi sensibles mais de manière variable suivant les biotopes. Elles peuvent migrer vers les horizons profonds du sol pour s'affranchir des conditions extérieures. Ces dernières sont mieux adaptées au sol sous culture. L'importance des espèces endogées est traduite par leur présence permanente dans tous les biotopes, ce qui attesterait leur forte adaptabilité à la fluctuation des conditions écologiques.

### 3.2.1.3. Diversité spécifique

Les indices de diversité de Shannon montrent aussi une faible diversité spécifique entre les biotopes ciblés. Les indices d'équitabilité de Piélou permettant de mesurer la répartition des individus au sein des différents biotopes montrent que les endogés dominent significativement les épigés et les anéciques (Figure 17).



*Figure 17. Indices de diversité des lombriciens mesurés dans les différents biotopes*

Les valeurs les plus élevées ont été observées concomitamment dans la forêt dense semi décidue et la savane herbeuse avec respectivement  $H'=1,51$  et  $E=0,95$ . Les plus faibles valeurs avaient été observées dans le sol sous culture ( $H'=1,40$  et  $E=0,88$ ). Ce qui signifie que les techniques culturales peuvent jouer sur le niveau des populations de vers de terre, en affectant négativement leur diversité spécifique.

### 3.2.1.4. Evaluation des corrélations

Les corrélations de Bravais Pearson sont étudiées respectivement entre les catégories écologiques et entre les biotopes, elles sont rapportées dans les tableaux 10 et 11.

*Tableau 10. Matrice des coefficients de corrélation de Bravais Pearson entre les différentes catégories écologiques des lombriciens (Différence significative à : \*\*\*  $\alpha$  : 0,001, \*\*  $\alpha$  : 0,01 et \*  $\alpha$  : 0,05 ; ns : Différence non-significative).*

Variables	Epigés	Endogés	Anéciques
Epigés	1		
Endogés	0,954**	1	
Anéciques	0,908*	0,875*	1

Les résultats repris au tableau 10 montrent qu'il existe une corrélation positive et hautement significative entre les abondances des endogés et des épigés. Elle est positive et significative respectivement entre les endogés et les anéciques, et entre les anéciques et les épigés pour l'ensemble des biotopes investigués. Ce qui signifie que plus un environnement est favorable à l'abondance d'une catégorie écologique de vers de terre, plus il l'est également pour les deux autres.

*Tableau 11. Matrice des coefficients de corrélation de Bravais Pearson entre les différents biotopes (Différence significative à : \*\*\*  $\alpha$  : 0,001, \*\*  $\alpha$  : 0,01 et \*  $\alpha$  : 0,05 ; ns : Différence non-significative).*

Variables	FD	GF	RF	SA	SH	SSC
FD	1					
GF	0,890 <sup>ns</sup>	1				
RF	0,893 <sup>ns</sup>	<b>1,000***</b>	1			
SA	0,324 <sup>ns</sup>	0,720 <sup>ns</sup>	0,716 <sup>ns</sup>	1		
SH	0,495 <sup>ns</sup>	0,837 <sup>ns</sup>	0,834 <sup>ns</sup>	0,982 <sup>ns</sup>	1	
SSC	- 0,237 <sup>ns</sup>	0,232 <sup>ns</sup>	0,226 <sup>ns</sup>	0,842 <sup>ns</sup>	0,726 <sup>ns</sup>	1

Tous les coefficients de corrélation calculés entre les biotopes pour les populations totales de vers observées dans ceux-ci sont positifs sauf entre la forêt dense semi décidue et le sol sous culture où l'on observe une corrélation négative. Cependant, une seule corrélation est

significative. Il s'agit de la corrélation qui existe entre les populations totales de vers de terre observées dans la galerie forestière et le recrû forestier. Ce qui indique que contrairement aux autres biotopes la galerie forestière et le recrû forestier sont favorables au même type de lombricien et en comportent des densités très similaires.

### 3.2.1.5. Relations entre les catégories écologiques des lombriciens et les biotopes étudiés par l'analyse Factorielle des Correspondances

La matrice de départ, issue de la matrice de données « catégories écologiques X biotopes » est une matrice de données de 6 lignes et 3 colonnes représentant respectivement les biotopes et les catégories écologiques (Tableau 12). Les données ont été standardisées par le nombre total de chaque catégorie écologique recensée dans les différents biotopes. Cette précaution est prise afin d'éviter que les grandes différences d'effectif influencent de façon prépondérante l'analyse.

*Tableau 12. Matrice des données standardisées des densités relatives des catégories écologiques*

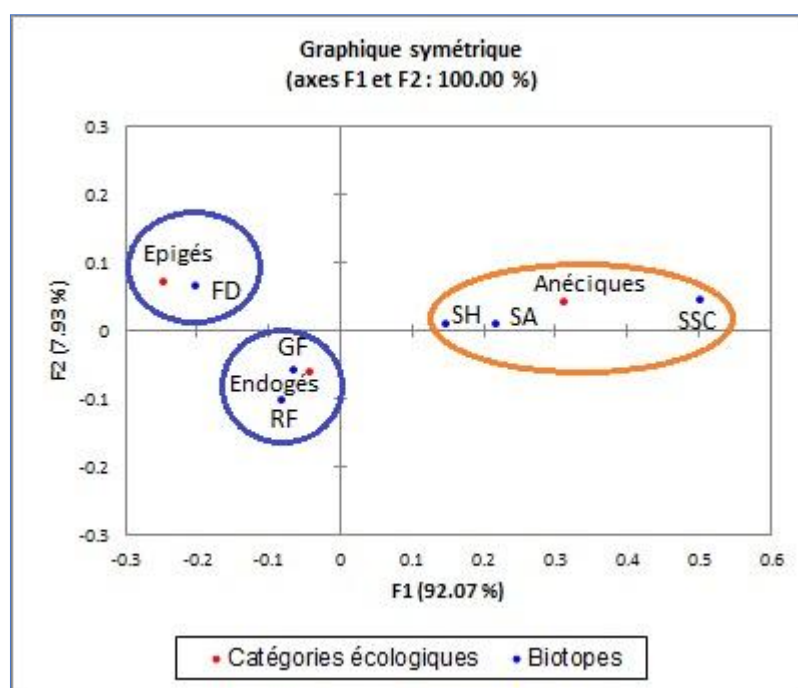
Biotopes	Epigés	Endogés	Anéciques
FD	0,40	0,29	0,23
GF	0,23	0,24	0,20
RF	0,14	0,17	0,13
SA	0,09	0,13	0,17
SH	0,10	0,11	0,15
SSC	0,03	0,06	0,12

L'application de l'analyse factorielle des correspondances sur les données qualitatives a permis de tracer les affinités entre les catégories écologiques des lombriciens et leurs biotopes ainsi que de définir des éventuelles corrélations. Le tableau 13 rapporte la contribution des valeurs de chaque variable à la formation du 1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> axe factoriel.

*Tableau 13. Contributions des variables dans la définition des axes factoriels*

Axes	Valeurs propres	Inertie (%)	% cumulé
F1	0,036	88,836	88,836
F2	0,004	11,164	100,000

Ces résultats permettent de définir 2 groupes, les 2 axes factoriels interprétés expriment 100 % de la variance de l'échantillon (Figure 18).



*Figure 18. Projection de la corrélation entre les taxa lombriciens et les biotopes dans l'espace défini par les deux axes factoriels*

Le premier constitué par la savane arborescente, la savane herbeuse et le sol sous culture. Ces biotopes sont caractérisés par la prédominance des espèces anéciques, cela démontre que la densité de ces taxa n'est pas corrélée aux biotopes suffisamment humides et riches en fractions fines favorisant l'humidité dans le sol ; probablement parce que ces taxa peuvent franchir avec succès des perturbations sévères. Le second groupe formé du côté négatif par la forêt dense semi décidue est caractérisé par la prépondérance des taxa épigées. Cela montre leurs aptitudes liées aux sols avec des teneurs élevées en matière organique mais aussi en humidité. L'axe 2 est formé dans son ensemble par la galerie forestière et le recrû forestier. Il est caractérisé par la prépondérance des endogés du côté négatif.

Ce qui signifie que ces taxa possèdent un pouvoir d'expansion extraordinaire lorsque les conditions leur sont favorables. Ces taxa sont généralement plus abondantes dans les sols humides et nichent dans l'horizon minéral.

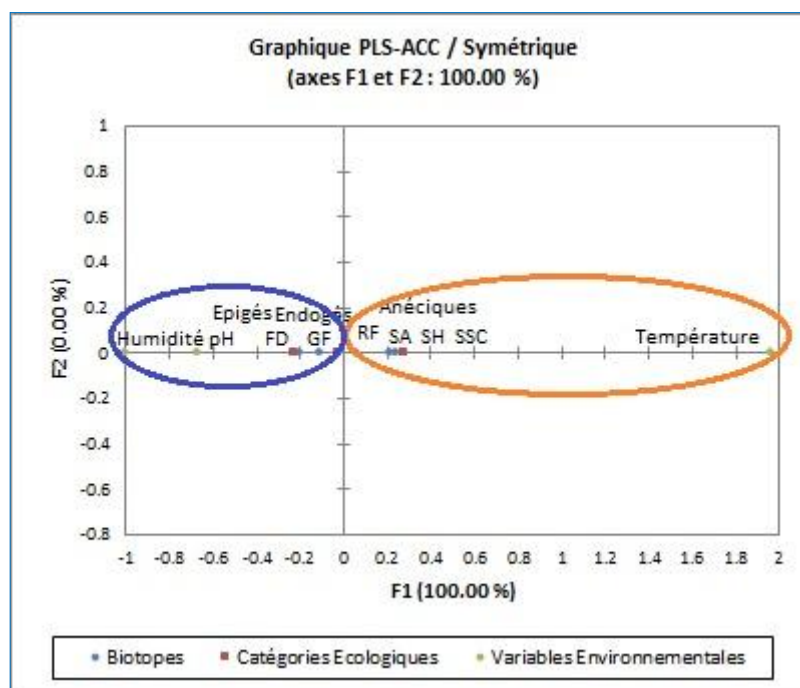
### 3.2.1.6. Effets des variables environnementales sur les structures écologiques par l'Analyse Canonique des Correspondances

La variance expliquée est de 100 % pour le F1 (Tableau 14). Les valeurs propres montrent que le 1er axe canonique (F1) seul explique 100 % de l'information de la variabilité des données, ce qui est suffisant du point de vue interprétation des données.

*Tableau 14. Contributions des variables dans la définition des axes canoniques*

Axes	Valeurs propres	Inertie non-contrainte (%)	% cumulé	Inertie totale	% cumulé (%)
F1	0,035	100,000	100,000	74,942	74,942

L'ACC montre que les corrélations entre les catégories écologiques des lombriciens et les variables environnementales (pH, température et humidité) sont élevées dans l'ensemble (Figure 19).



*Figure 19. Projection de la corrélation entre les catégories écologiques des lombriciens et les variables dans l'espace défini par les deux axes canoniques*

Cette ACC indique que l'axe canonique F1 est positivement corrélé avec les espèces anéciques et la température (variable explicative). Par contre, il est négativement corrélé avec les espèces épigées et endogées. Ce qui signifie que les anéciques peuvent côtoyer les biotopes anthropisés et supporter une faible humidité et un pH acide tandis que les épigés et les endogés sont liés plus au pH moins acide et à une forte humidité des sols, ils se localisent dans les biotopes forestiers, riches en matière organique.

### **3.2.2. Discussion**

#### **3.2.2.1. Hétérogénéité des communautés de vers de terre**

En effet, il existe un lien entre les densités des populations de lombriciens et leurs biotopes. Il en va de même pour l'importance relative des catégories écologiques. Cette relation semble être principalement fonction du degré de dégradation des composantes du milieu dont se nourrissent les vers de terre. L'étude a rejoint les conclusions de Guenola (2003) selon lesquelles les conditions pédoclimatiques influent de manière significative sur les catégories écologiques des lombriciens dont l'importance relative apparaît comme un descripteur caractéristique de la pression anthropique.

Il y a une prédominance manifeste des épigés par rapport aux anéciques dans la forêt dense semi décidue, celle-ci peut être attribuée non seulement au maintien de l'humidité, même dans les premiers centimètres du sol, mais aussi à l'abondance et à la qualité de la matière organique qui s'y trouve et qui alimente l'horizon humifère en nutriments dont se nourrissent les épigés. En effet, la forêt dense semi décidue connaît de très faibles fluctuations des conditions climatiques ; en conséquence, l'humidité du sol y reste élevée suite à la réduction de l'évapotranspiration, liée en partie à la diminution de la vitesse du vent qui expliquerait la préservation de ce haut niveau d'humidité favorable au développement des lombriciens (Dajoz, 2000).

Dans les galeries forestières, la présence de plages de sols non protégées par le couvert végétal se traduit par une forte pénétration des rayons du soleil qui réduisent l'humidité du sol (Milau *et al.*, 2015). Ce qui peut justifier la légère diminution la densité lombricienne par rapport à celle observée dans la forêt dense semi décidue.

Le recrû forestier avec la présence d'importants débris résiduels de la déforestation offre autant de sources de nutriments à la macrofaune lombricienne, mais les fréquentes interventions humaines limitent le développement de l'ensemble des catégories écologiques de vers de terre, en influençant principalement les espèces épigées. En outre, l'importance de la prédation exercée sur les vers de terre tend également à augmenter avec l'importance des interventions humaines. Le changement de structure de la végétation modifie également les conditions microclimatiques en surface, en particulier en asséchant l'air et en augmentant les amplitudes thermiques (Strehlow *et al.*, 2002 ; Milau *et al.*, 2015). Les études réalisées en Amazonie avaient déjà montré combien la coupe de la forêt pouvait affecter la densité des communautés lombriciennes (Lavelle & Pashanasi 1989 ; Fragoso *et al.*, 1999), mais peu d'études ont jusqu'ici quantifié la perte en espèces subséquente.

La prédominance des vers endogés dans ce biotope peut être attribuée à leur grande capacité d'ingérer la matière organique contenue dans les horizons profonds du sol, ce qui les préserve de l'attaque des prédateurs et de l'impact des activités anthropiques. Par contre, les épigés et les anéciques qui se nourrissent préférentiellement en surface n'ont pu subsister en nombre après les perturbations dues à ces activités anthropiques, ils ont été les plus éliminées.

La savane arborescente et la savane herbeuse parcourues par les feux de brousse annuels se caractérisent par une végétation majoritairement herbacée, produisant une faible quantité en nutriments et en matière organique, ce qui ne permet pas le bon développement des lombriciens, car la savanisation s'accompagne souvent d'un appauvrissement de la macrofaune du sol, en particulier des vers de terre (Fragoso *et al.*, 1999). Pareillement à l'appauvrissement en MO, les mêmes mécanismes que ceux cités précédemment, vis-à-vis des conditions microclimatiques, peuvent être également évoqués dans ce contexte.

C'est ainsi que la densité lombricienne dans les sols nus ou sous cultures est faible, tout particulièrement pour les épigés. Ceci corrobore le fait que les pratiques agricoles limitent le développement de l'ensemble des catégories écologiques, principalement les espèces épigées qui peuvent totalement disparaître ; les espèces endogées et anéciques sont aussi très sensibles aux conditions qui prévalent dans un tel milieu (Raw, 1959). Evans & Guild (1948) ont d'ailleurs montré qu'un labour peut réduire la communauté lombricienne de 70 % en 5 ans. Hopp (1947) confirme ces observations en soulignant que la charrue à disques et le sarclage sont particulièrement nocifs pour les espèces de surface. De même, la conversion de

la forêt en culture transforme complètement le milieu. La température moyenne du sol augmente de plus de 5° C. Et certains vers tropicaux évitent les températures très élevées (Ortiz-Ceballos & Fragoso, 2004).

### 3.2.2.2. Influence de l'occupation et de l'utilisation du sol sur les catégories écologiques

Pour rappel, l'occupation du sol (land cover) décrit l'état physique des terres, de la surface du sol (type de végétation, présence d'eau, de roches). Un changement d'occupation du sol peut consister en une conversion (passage de la forêt à la culture) ou en une modification (densité d'arbres d'une forêt). A contrario, l'utilisation des terres (land use) décrit la façon dont les hommes utilisent la terre, les usages, les pratiques ; par exemple, le type d'agriculture, de pâturage ou d'habitat (Burel & Baudry, 2003). L'occupation du sol peut varier alors que l'utilisation du sol reste stable.

Les analyses multivariées ont permis de compléter les résultats acquis lors de l'étude de la structure des communautés lombriciennes. Il ressort de l'AFC que les différentes catégories écologiques sont caractéristiques des biotopes. Comme Guenola (2003), l'étude a mis en évidence des réponses variables suivant les catégories écologiques en distinguant les paramètres influant chacune de ces catégories écologiques. Les lombriciens possèdent une capacité d'adaptation aux facteurs du milieu. Certaines espèces peuvent être adaptées physiologiquement aux caractéristiques extérieures suite à des facteurs du milieu. Les pourcentages de ces groupes écologiques sont donc liés à leurs caractéristiques et leurs habitudes alimentaires.

Les espèces épigées sont caractéristiques de la forêt dense semi décidue. Elles sont reconnues comme étant les plus sensibles à la mise en culture (Hopp, 1947), à la prédation et aux piétinements. Cette sensibilité est due principalement à l'absence de couvert herbacé (ressource trophique et protection), et aux actions anthropiques car la localisation à la surface du sol de ces espèces les rend particulièrement vulnérables aux effets générés par les pratiques comme le labour, la culture ou le brûlis. Ces vers épigés sont influencés de manière plus importante que les autres catégories, pouvant aller jusqu' à disparaître. Ce qui fait de la forêt dense l'habitat favorable au bon développement de cette catégorie écologique.



Les endogés sont aussi très sensibles aux activités anthropiques que les épigés (Rovira *et al.*, 1987) ; la destruction annuelle de leur habitat perturbe ces espèces sachant qu'ils vivent dans des galeries sub-horizontales à horizontales (Lee & Foster, 1991). Ce pendant ces espèces lombriciennes sont reconnues comme étant moins sensibles à la disponibilité de nutriments superficiels (Wyss & Glasstetter, 1992 ; Binet, 1993 ; Fragoso *et al.*, 1997). En effet, les endogées consomment principalement la fraction minérale du sol associée à la matière organique humifiée. En tout état de cause, les espèces de ce dernier groupe écologique doivent consommer de grandes quantités de sol s'ils veulent couvrir leurs exigences en énergie ; leur régime alimentaire est basé plus ou moins sur les détritiques organiques décomposés qui sont énergétiquement pauvres et parfois difficile à digérer, ce qui influencent automatiquement leurs croissances, leurs reproductions et bien sûr leurs abondances et biodiversité (Spehn *et al.*, 2000 ; Koné *et al.*, 2012). De ce fait, ils sont caractéristiques de la galerie forestière et du recrû forestier.

Par ailleurs, les caractéristiques morphologiques et comportementales des anéciques leur permettent de mieux résister aux contraintes anthropiques que les épigés et les endogés. Ils se nourrissent de la litière et favorisent bien la dynamique du réseau alimentaire du sol. Leur présence plus importante dans des systèmes anthropisés (savane arborescente, savane herbeuse et sol sous culture) a été soulignée dans plusieurs travaux (Binet, 1993 ; Chan, 2001 ; Fragoso *et al.*, 1997). Cette résistance aux pressions anthropiques relève de la stratégie adaptative leur permettant de répondre auxdites pressions (Decaëns & Jiménez, 2002).

L'ACC indique que les vers anéciques sont positivement corrélés le long du premier axe avec la température, ceci met clairement en évidence leur capacité adaptative dans les biotopes anthropisés et suggère que les espèces anéciques caractérisent les sols subissant plus fortement l'effet de la dynamique des activités humaines. En effet, la température (paramètre explicatif) a couramment été cité dans la littérature pour discriminer la structure des vers de terre dans les biotopes (Bouché, 1972 ; Lavelle *et al.*, 1998).

Du côté négatif de l'axe canonique F1 de l'ACC, les fortes humidités du sol et les pH moins acides s'avèrent être les paramètres explicatifs de la présence des espèces épigées et endogées principalement dans la forêt dense semi décidue et dans la galerie forestière. Il est important de relever que l'humidité est un facteur primordial régulant la densité et la distribution des espèces lombriciennes par conséquent, les biotopes forestiers offrant les valeurs d'humidité

élevées favorise la dominance des espèces épigées et endogées. Lorsque les conditions de température du sol deviennent défavorables (hausse trop importante de la température) et le pH du sol trop acide, la survie, la fécondité et la croissance des lombriciens sont affectées (Lee, 1985). Ces résultats sont en adéquation avec ceux des études conduites en milieux humides et soumis aux crues et ou à des périodes d'engorgement temporaires ou permanents (Wirth, 2001).

### **3.2.3. Conclusions**

L'utilisation de la communauté de vers de terre comme indicateur des effets de l'occupation du sol sur leur structure a abouti à une généralisation des résultats. Les descripteurs utilisés ont reflétés la variabilité de la structure des communautés en liaison avec les conditions du milieu. Les traits biologiques et écologiques des espèces rassemblent l'ensemble des informations qualitatives et quantitatives associées aux organismes et à leurs relations avec les biotopes qui les inféodent. Ces traits ont caractérisés le cycle de vie, les potentialités de résistance, ou de résilience, mais aussi la morphologie, la physiologie ou le rôle fonctionnel d'une catégorie.

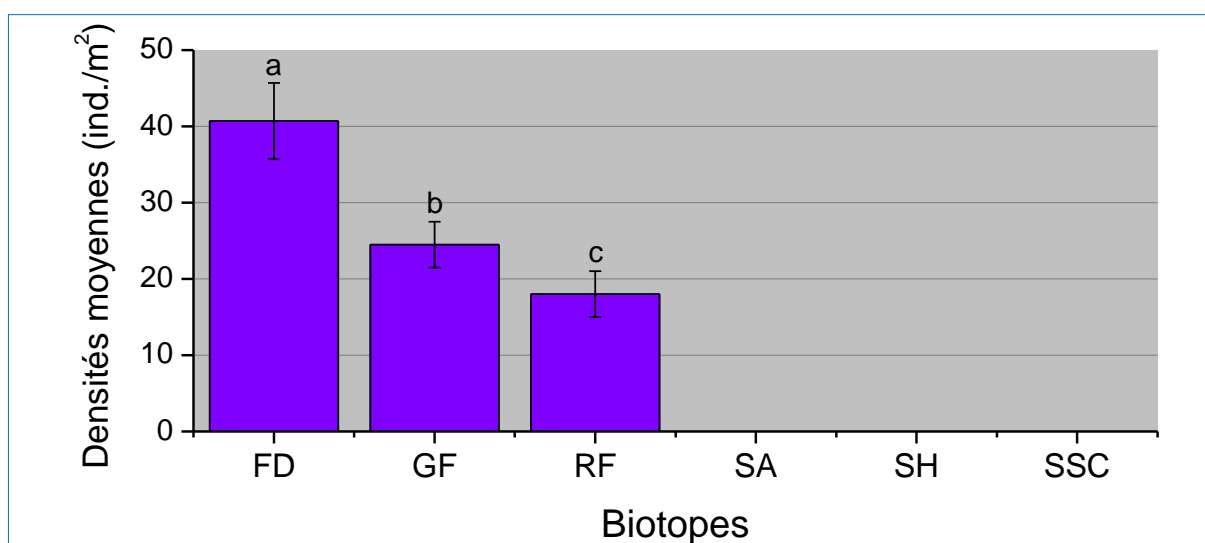
La dégradation du couvert forestier s'accompagne de conditions de moins en moins favorables au développement des épigés dans les premiers centimètres du sol, on constate une diminution de l'importance relative de cette catégorie écologique dans les biotopes les plus transformés par les actions anthropiques, c'est-à-dire dans les parcelles anthropisées. A l'évidence, la conversion de la forêt en toute autre occupation du sol modifie la quantité de matière organique, les concentrations en nutriments et le microclimat du sol ; ce qui engendre inéluctablement des conséquences sur toutes les composantes de la biodiversité. La mise en place de système de production agro-forestier devrait permettre de limiter cette tendance négative et d'assurer une meilleure gestion de la fertilité du sol.

### 3.3. Relation entre les activités lombriciennes et les processus associés à la restauration des sols

#### 3.3.1. Caractérisation des vers de terre décomposeurs du bois

##### 3.3.1.1. Densités des vers de terre

D'après la figure 20 ci-dessous, les valeurs moyennes de la densité des vers de terre décomposeurs fluctuent d'une manière régressive depuis la forêt dense semi décidue vers le sol sous culture. Le test de Fisher est significatif ( $p < 0,001$ ).

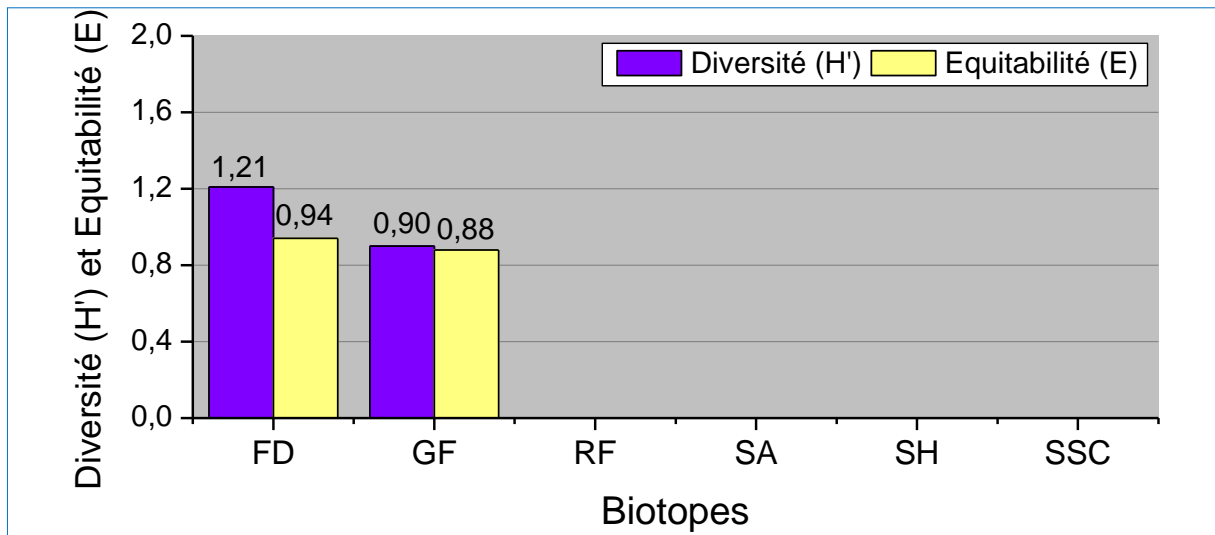


*Figure 20. Variabilité de la densité des vers décomposeurs mesurée dans les biotopes [Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $p < 0,05$ ) d'après le test de Fisher LSD]*

La forêt dense semi décidue renferme les plus importantes densités lombriciennes que les autres biotopes. La galerie forestière présente aussi une communauté lombricienne abondante tandis que le recrû forestier s'illustre avec une communauté lombricienne significativement faible. Par contre, la savane arborescente, la savane herbeuse et le sol sous culture se distinguent par des absences totales des communautés lombriciennes décomposeurs des bois. Cela signifie que ces vers décomposeurs ne colonisent qu'un habitat de type forestier, c'est-à-dire en présence d'arbres, sous ombrage avec de litières épaisses. C'est un biotope où l'humidité du sol est bien conservée.

### 3.3.1.2. Diversité spécifique des vers décomposeurs dans les biotopes

La valeur la plus élevée de la diversité a été observée dans la forêt dense semi décidue avec  $H'=1,21$  suivit de la galerie forestière avec  $H'=0,90$  (Figure 21).



*Figure 21. Indices de diversité des vers décomposeurs mesurés dans les différents biotopes*

L'équitabilité varie faiblement, la valeur la plus élevée a été observée dans la forêt dense semi décidue ( $E=0,94$ ), suivit par la galerie forestière ( $E=0,88$ ). Les résultats montrent donc qu'il n'y a pas de dépendance spatiale forte entre les biotopes, en termes de diversité et composition.

### 3.3.1.3. Densité et diversité des vers décomposeurs dans les bois

Le bois de *P. eetveldeana* a contenu à la fois la plus grande diversité ( $H'=1,23$ ) et équitabilité ( $E=0,95$ ), suivit du bois de *D. manii* avec  $H'=1,19$  et  $E=0,93$  (Figure 22). Les essences des bois d'*H. acida* et *D. englerianum* n'ont présenté aucune diversité et équitabilité. Ceci peut être mis en relation avec les préférences alimentaires des espèces lombriciennes.

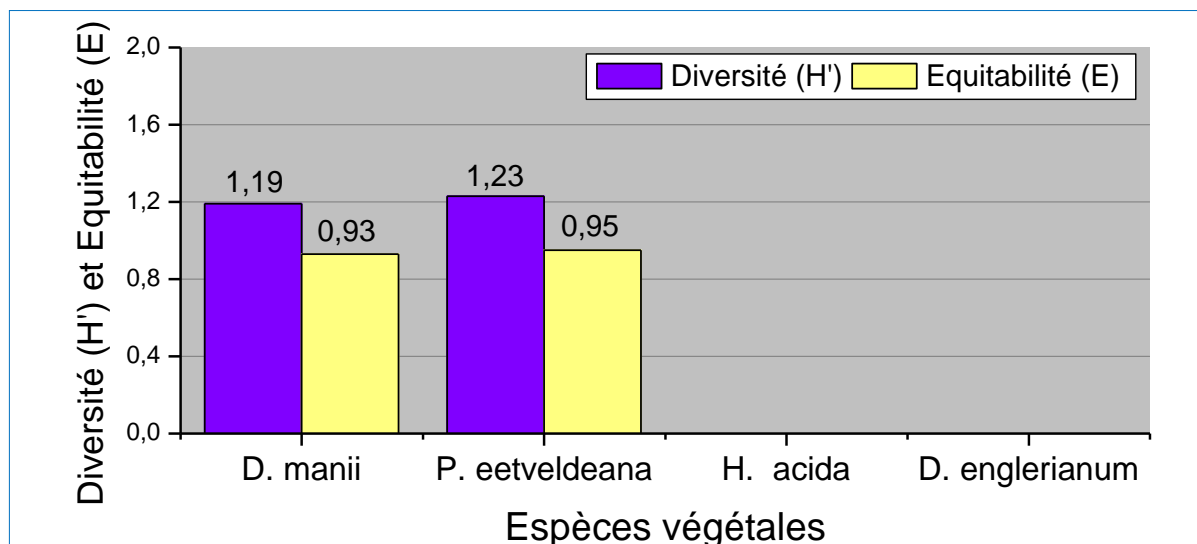


Figure 22. Indices de diversité des vers décomposeurs mesurés dans les différentes espèces végétales

Les essences végétales présentent des abondances significatives en espèces lombriciennes décomposeurs ( $p<0,001$ ) (Figure 23).

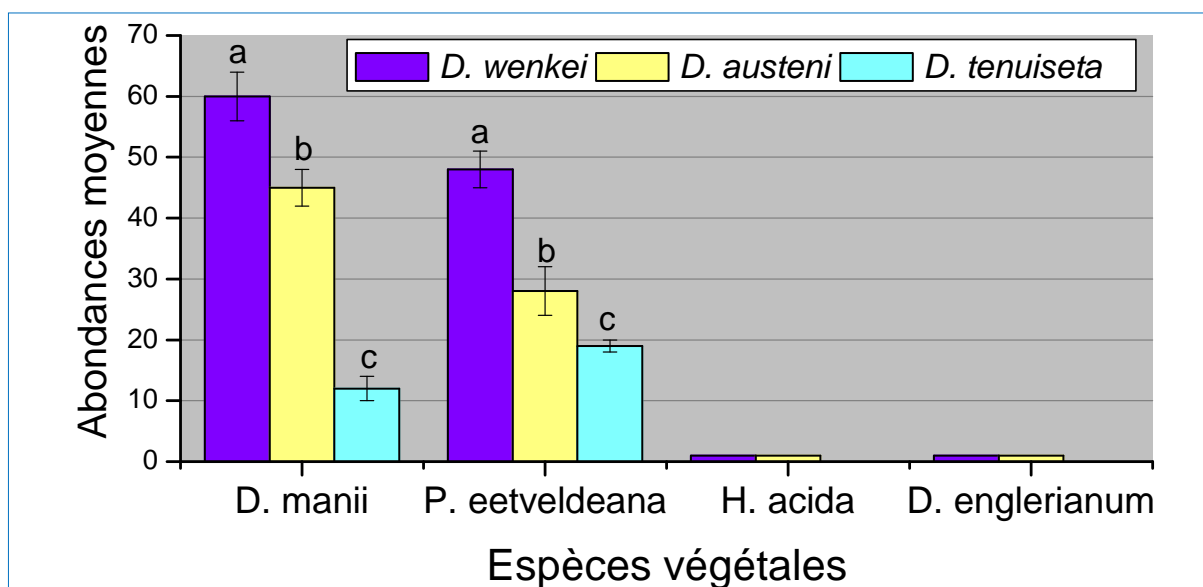


Figure 23. Abondances des vers décomposeurs mesurées dans les différentes espèces végétales

Dans les bois de *D. manii* et *P. eetveldeana* prédomine l'espèce *D. wenkei*, suivit de *D. austeni* et *D. tenuiseta*. Cela signifie que les bois de *D. manii* et *P. eetveldeana* seraient appétants pour les vers décomposeurs, ils contiendraient peut être des fortes proportions de composés solubles. Par contre, la qualité biochimique des bois de *D. englerianum* et d'*H. acida* ne conviendrait pas aux vers de terre.

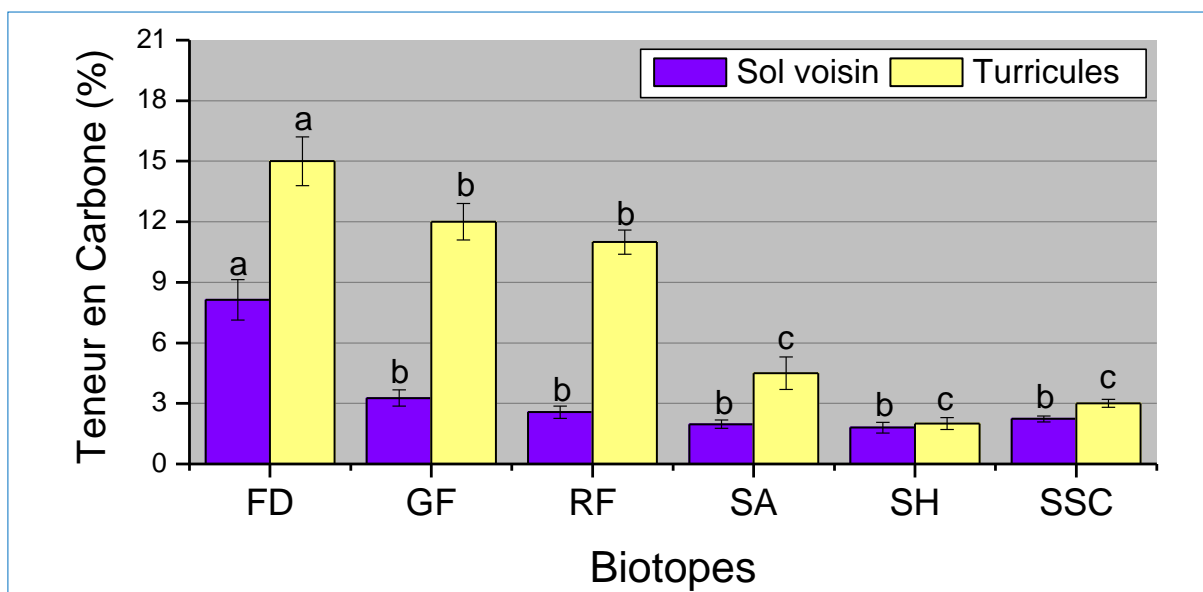
### **3.3.2. Evaluation des effets des activités des vers de terre sur l'enrichissement des sols**

L'action des lombriciens durant l'expérimentation peut être estimée par la production des turricules. Les teneurs en carbone (C) et azote (N) et en éléments traces métalliques (ETM) des turricules sont comparées à celles du sol voisin.

#### **3.3.2.1. Concentration en carbone (C)**

Les concentrations en carbone des sols et des turricules dans les différents biotopes sont représentées dans la figure 24. Toutefois, les turricules observés sur le terrain sont difficilement attribuables à une espèce, le dispositif expérimental ne permettant pas l'identification de l'origine des turricules.

Dans le sol, les concentrations en carbone régressent significativement entre les biotopes ( $p < 0,001$ ). La forêt dense semi décidue comporte des valeurs plus considérables que les autres biotopes. Ce qui signifie que les sols localisés dans les autres biotopes sont pauvres en carbone alors que, ceux de la forêt dense semi décidue seraient mieux pourvus. Ce qui conforte le fait que la densité des vers de terre, leurs biomasses ainsi que la composition de leurs communautés varient selon le type de sol et surtout avec l'abondance de sources de carbone organique du biotope

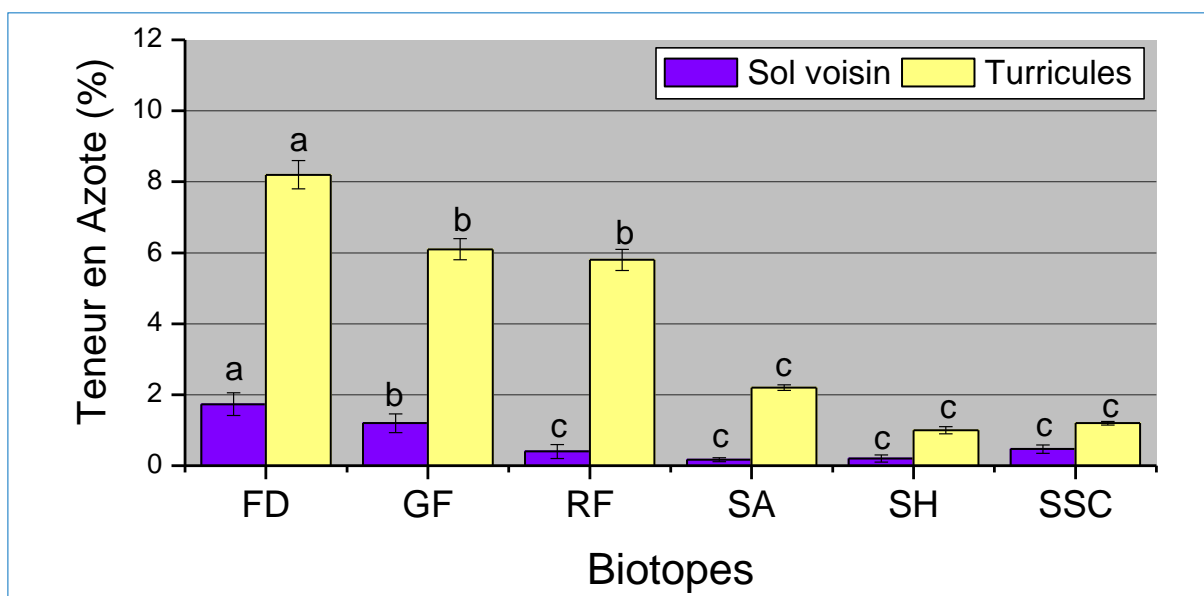


**Figure 24.** Concentration en carbone dans les sols et dans les turricules pour les différents biotopes [Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $p < 0,05$ ) d'après le test de Fisher LSD]

Concernant les turricules, une différence très hautement significative des concentrations en carbone apparaît aussi entre les biotopes ( $p < 0,001$ ). Comme dans le cas des sols, la forêt dense semi décidue se différencie de la galerie forestière et du recrû forestier ; ces 2 derniers se différenciant à leur tour des autres biotopes. Ces fortes teneurs dans les turricules traduisent leur enrichissement en carbone par rapport au sol voisin.

### 3.3.2.2. Concentration en azote

Une différence très hautement significative ( $p < 0,001$ ) des teneurs en azote caractérise le sol dans les différents biotopes (Figure 25). Toutefois, la forêt dense semi décidue présente des teneurs en azote très significativement différentes de la galerie forestière, cette dernière se différencie aussi des autres biotopes. Ces concentrations élevées en azote dans ces sols traduisent le fait qu'ils reçoivent d'importantes quantités de matière organique qui jouent un rôle important dans l'approvisionnement du sol en azote après sa minéralisation.



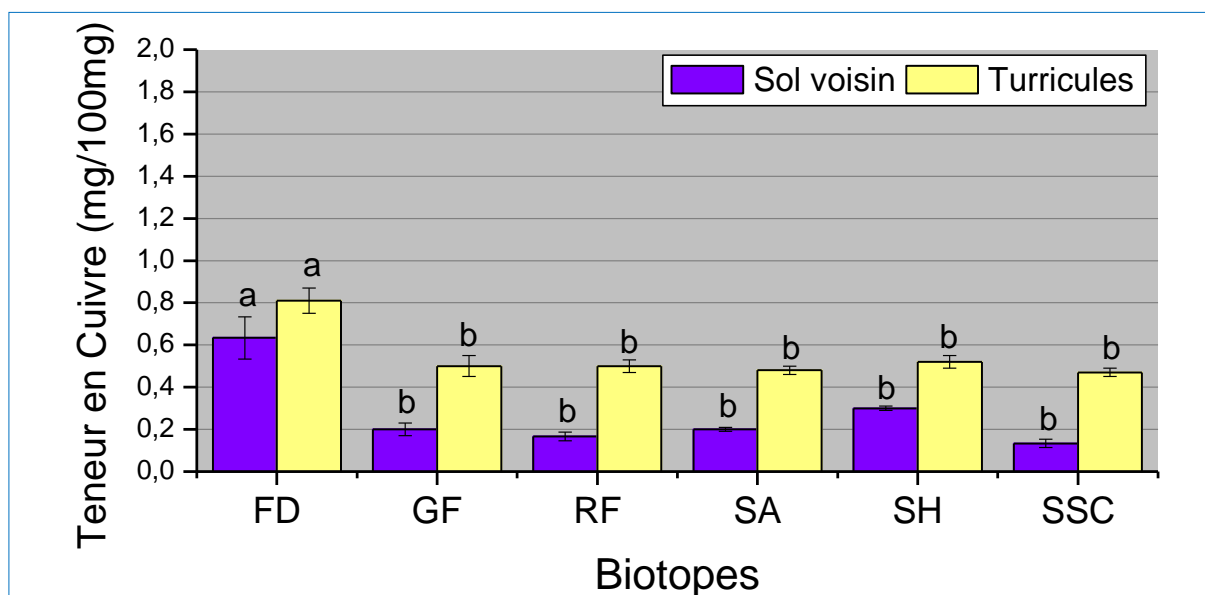
*Figure 25. Concentration en azote dans les sols et dans les turricules pour les différents biotopes [Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $p < 0,05$ ) d'après le test de Fisher LSD].*

Comme pour le carbone, les turricules présentent une différence très hautement significative des teneurs en azote entre les biotopes ( $p < 0,001$ ). Les concentrations élevées enregistrées dans la forêt dense semi décidue la différencie nettement de la galerie forestière et du recru forestier, ces 2 derniers sont significativement différents de la savane arborescente et de la savane herbeuse qui se sont différenciées du sol sous culture. Comme attendu, les turricules présentent de plus importantes teneurs que le sol voisin, ce qui traduit leur enrichissement en azote.

### 3.3.2.3. Concentration en cuivre

Dans le sol, les teneurs en cuivre présentent des différences hautement significatives entre les différents biotopes ( $p < 0,001$ ). D'importantes teneurs sont enregistrées dans la forêt dense semi décidue, différenciant cette dernière de tous les autres biotopes qui présentent des valeurs similaires entre eux (Figure 26).



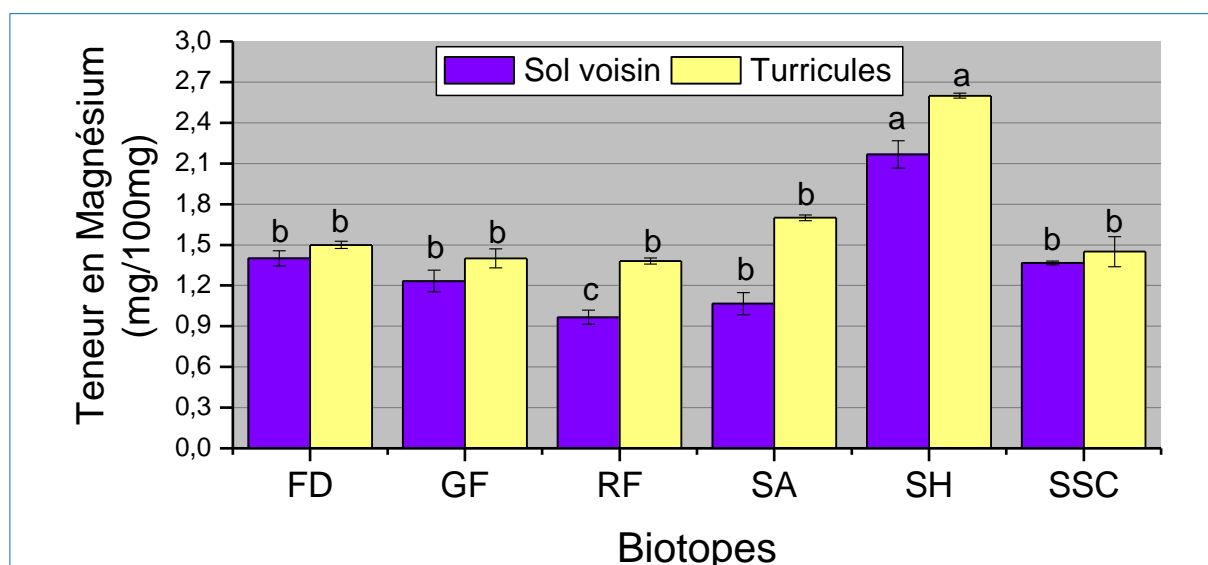


*Figure 26. Concentration en cuivre dans les sols et dans les turricules pour les différents biotopes [Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $p < 0,05$ ) d'après le test de Fisher LSD]*

Tout comme dans le sol, les turricules présentent des différences hautement significatives entre les biotopes ( $p < 0,001$ ). Aussi la forêt dense se démarque des autres biotopes par d'importantes teneurs. Comparant les teneurs entre le sol voisin et les turricules, il s'avère que les turricules sont bien plus enrichis en cuivre avec de teneurs beaucoup plus considérables. Ce qui traduit des conditions très favorables pour une bonne minéralisation de la matière organique suite à une bonne activité lombricienne.

#### 3.3.2.4. Concentration en magnésium

Comme attendu, les teneurs en magnésium apparaissent très hautement significatives entre les différents biotopes ( $p < 0,001$ ). La savane herbeuse se distingue de loin par des teneurs beaucoup plus importantes que les autres biotopes (Figure 27).



**Figure 27.** Concentration en magnésium dans les sols et dans les turricules pour les différents biotopes [Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $p < 0,05$ ) d'après le test de Fisher LSD]

Il en est de même des turricules qui présentent des différences hautement significatives entre les différents biotopes (0,001) et où une fois de plus la savane herbeuse se démarque avec des teneurs significatives. Cependant, le sol voisin et les turricules n'ont présentés aucune différence.

### 3.3.2.5. Concentration en zinc

La disponibilité en zinc dans le sol différencie significativement les biotopes. Des teneurs élevées en Zn dans les sols sont enregistrées dans la savane herbeuse, suivie de la forêt dense semi décidue. Tous les autres biotopes se caractérisent par des teneurs relativement faibles (Figure 28). Les teneurs en zinc des turricules se différencient aussi entre les différents biotopes ( $p < 0,001$ ). De même que dans le sol voisin, la savane herbeuse se démarque par des teneurs beaucoup plus considérables suivie de la forêt dense semi décidue. Par contre, la galerie forestière, le recru forestier, la savane arborescente et le sol sous culture en comportent les plus faibles. Cependant ces teneurs ne font apparaître aucune différence entre le sol voisin et les turricules.

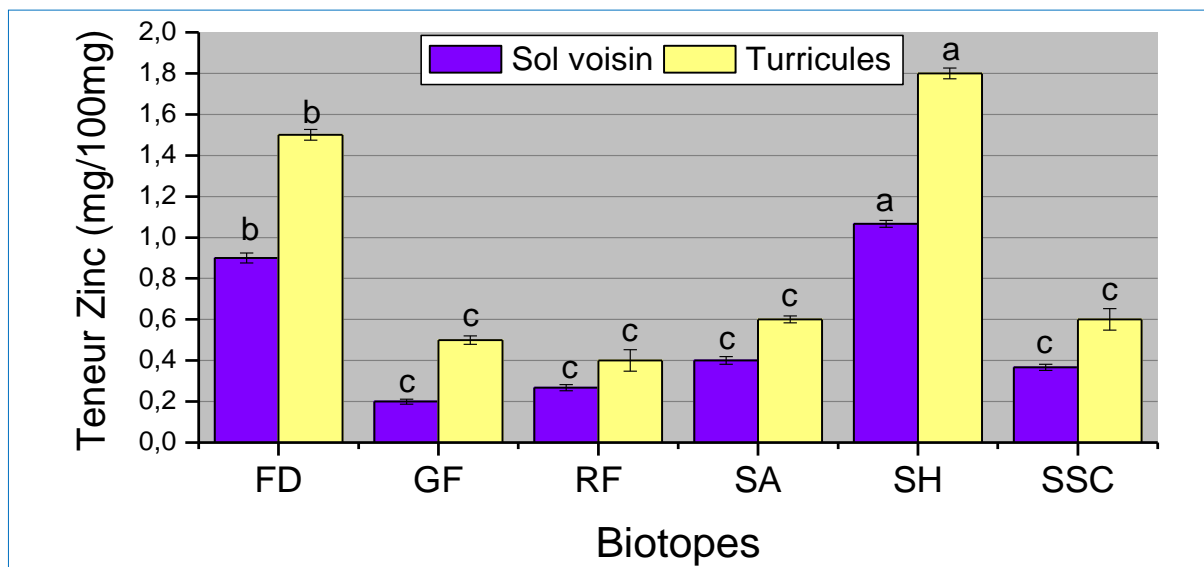


Figure 28. Concentration en zinc dans les sols pour les différents biotopes [Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $p < 0,05$ ) d'après le test de Fisher LSD]

### 3.3.3. Discussion

#### 3.3.3.1. Diversité des lombriciens décomposeurs du bois

La température et l'humidité du sol sont des facteurs clés régulant l'abondance et l'activité des vers de terre en milieu naturel et les populations lombriciennes répondent rapidement aux variations de ces facteurs (Satchell, 1967 ; Sims & Gerard 1999). On comprend dès lors que la distribution de la faune lombricienne décomposeur du bois au sein des différents biotopes soit inégale. Les valeurs d'abondances significativement importantes sont partagées entre la forêt dense semi décidue, la galerie forestière et le recrû forestier faisant d'eux les biotopes les plus riches, les mieux adaptés et donc les plus favorables à cette pédofaune. La savane arborescente, la savane herbeuse et le sol sous culture se distinguent par une absence totale de communauté lombricienne décomposeur. En effet, dans la plupart des écosystèmes terrestres, le ver de terre n'est pas capable de dégrader le bois frais, leur action sur cette litière nécessite l'intervention préalable d'autres micro-organismes comme par exemple les bactéries et les champignons qui dégradent le bois jusqu'à un certain niveau avant les attaques progressives de la macrofaune. Ceci expliquerait de fortes abondances lombriciennes observées quand bien même la méthode utilisée ne permettait pas de mettre en exergue les apports simultanés des bactéries et des champignons dans ce processus. La présence des lombriciens décomposeurs dans les biotopes forestiers plutôt que dans ceux qui sont anthropisés s'expliquerait d'une part

par les conditions pédoclimatiques qui règlent la distribution des communautés lombriciennes dans les biotopes et d'autre part par la dépendance écologique de *D. wenkei*, *D. austeni* et *D. tenuiseta* vis-à-vis de biotopes étudiés.

Il paraît par conséquent évident que la forêt dense semi décidue et la galerie forestière soient associées en même temps à d'importantes diversités et équitabilités taxonomiques en opposition au recrû forestier, à la savane arborescente, à la savane herbeuse et au sol sous culture. Ces résultats rejoignent les conclusions de Lavelle *et al.* (1994) selon lesquelles, les vers de terre sont très diversifiées et très sensibles à toute modification du milieu et agissent différemment dans les biotopes suivant leur adaptabilité d'une part aux facteurs climatiques et d'autre part à la disponibilité alimentaire. Par ailleurs, les usages anthropiques, en modifiant les propriétés naturelles d'un sol, conditionnent l'évolution des communautés en place d'où les différenciations des communautés lombriciennes qui sont apparues entre les biotopes, réconfortant la conclusion selon laquelle la forêt dense semi décidue et la galerie forestière sont les biotopes de référence abritant d'importantes abondances lombriciennes que le recrû, la savane et le sol sous culture (Lee, 1985 ; Decaëns *et al.*, 2008).

D'autre part, la carence en communauté lombricienne décomposeur dans le recrû forestier, la savane arborescente, la savane herbeuse et le sol sous culture s'expliquerait du fait que chaque biotope présente des filtres particuliers qui conditionnent la structure des communautés : il s'agit notamment de la disponibilité de la matière organique, de l'apport en nutriments, du régime alimentaire de l'espèce et de son adaptation aux conditions environnementales. En d'autres termes, l'abondance lombricienne est corrélée positivement avec les conditions pédoclimatiques. Voilà pourquoi on considère l'évolution des communautés lombriciennes comme une valeur indicatrice de l'usage des sols agricoles (Buckerfield *et al.*, 1997).

### 3.3.3.2. Interactions entre communauté lombricienne et les essences ligneuses

La vitesse et l'ampleur de la dégradation du bois déterminent sa dureté et l'influence des facteurs abiotiques (Staccioli *et al.*, 1997). Cette dureté naturelle des bois se définit par sa résistance intrinsèque aux attaques d'organismes destructeurs.

Concernant la présente étude, le fait que les bois des *D. manii* et *P. eetveldeana* aient présenté des valeurs de diversité et d'équitabilité taxonomique significativement élevées signifierait un effet positif de l'attaque lombricienne relayée par *D. wenkei*, *D. austeni* et *D. tenuiseta*. Par contre, les bois de l'*H. acida* et du *D. englerianum* sont peu peuplés en lombriciens et présentent des valeurs de diversité et d'équitabilité nettement plus faibles, traduisent leur forte durabilité due à la présence d'un duramen épais, ce qui limite les attaques lombriciennes.

En effet, c'est la vitesse de la décomposition qui est corrélée positivement à la qualité nutritionnelle de la litière. De plus, l'appétence d'une litière par les lombriciens est corrélée négativement à sa teneur en azote (Satchell & Lowe, 1967). Si la litière utilisée est riche en azote, elle contient peut être des composées phénoliques non appétants. Le métabolisme des vers de terre ne leur permettant pas de dégrader la lignine et des dérivés de cellulose, mais plutôt leurs résidus issus de l'activité fongique et microbienne (Paoletti, 1999).

Un autre facteur important est le biotope d'origine des essences utilisées. Il est corrélé positivement à l'augmentation de la résistance de l'essence. Pour rappel, le *D. manii* et *P. eetveldeana* sont les essences typiques des forêts. En revanche, l'*H. acida* et le *D. englerianum* les sont des savanes. Cela expliquerait, la forte résistance de ces essences végétales exposées à des vents violents et aux fortes amplitudes thermiques qui les ont adaptés à ces milieux stressants. Cette hypothèse est la plus évoquée par de nombreuses études sur des bois biodégradés d'origines et d'essences différentes qui ont montré que la transformation progressive des parois cellulaires de bois en matériel lignifié est dominée par des processus similaires (Hatcher *et al.*, 1982 ; Hedges *et al.*, 1985). Dans certains cas, une partie des composés constituant la structure du bois résiste à la dégradation et affecte en retour le processus de décomposition (Stout *et al.*, 1988). Même si ces études ont fourni un aperçu sur la préservation des bois au sein de biotopes différents, l'explication biochimique de cette préservation exceptionnelle n'a pu être dévoilée.

Par ailleurs, 3 taxa lombriciens ont été recensés dans les bois en décomposition. Il s'agit de *D. wenkei*, *D. austeni* et *D. tenuiseta*. Seules la forêt dense semi décidue et la galerie forestière ont offert des conditions favorables à la décomposition de bois. Curry (2004) signale que les lombriciens ne peuvent vivre que dans du bois dont l'humidité est élevée. A ce point, la forêt dense semi décidue et la galerie forestière, grâce à leurs canopées, retiendraient une importante humidité de l'air et du sol. Ce qui favoriserait à la fois le développement des communautés lombriciennes et la décomposition du bois. En outre, Lavelle & Spain (2001) ont montré que l'humidité du bois est liée à celle de l'air car le bois se met en équilibre hygroscopique avec l'atmosphère qui l'entoure. Elle est un facteur conditionnant la colonisation par divers groupements d'organismes et influence ainsi sa dégradation.

### 3.3.3.3. Enrichissement des turricules en MO et ETM

Des fortes concentrations en C et N observées dans les turricules sont un trait commun des lombriciens (Rafidison, 1982 ; Lee, 1985 ; Binet, 1993 ; Jégou, 1998). Des teneurs de C et de N dans les déjections peuvent être de 1,5 à 2,0 fois supérieures à celles du sol environnant (Lee, 1985). Elles s'expliquent par leurs habitudes alimentaires. En effet, les espèces appartenant aux catégories écologiques des endogés et des anéciques ont la particularité d'ingérer sélectivement un substrat riche en matière organique que le sol environnant (Lavelle, 1979).

Dans les biotopes, l'accumulation de la litière et sa décomposition différencient fortement les écosystèmes naturels des écosystèmes anthropisés. La forêt dense semi décidue se distingue des autres biotopes par des teneurs hautement significatives en C et N du sol et des turricules. Ces différences de concentrations de C et N seraient attribuables au type d'occupation du sol. Car, à différents niveaux, des facteurs extrinsèques agissent sur la formation et la stabilisation des sols et des turricules. Sous l'effet du climat par exemple, les processus de minéralisation sont inhibés au sein même des turricules (Doubé *et al.*, 1994). Manley (1994) a constaté que la décomposition de la litière s'accompagne d'une augmentation de la teneur en C et N respectivement de 50 et 40 %. En effet, dans les sols sous couvert forestier les teneurs en M.O sont bien pourvues et les densités des lombriciens sont plus élevées. Ceci est expliqué par la relation étroite des vers de terre avec la matière organique. La liaison étroite entre la matière organique et les lombriciens est confirmée par de nombreuses études qui montrent une corrélation positive entre la densité et/ou la biomasse des lombriciens et la teneur en matière

organique du sol (Hendrix *et al.*, 1992). Edwards et Bohlen (1996) expliquent que les substrats à faibles teneurs en matière organique sont généralement pauvres en vers de terre. Les vers de terre influencent la dynamique de la matière organique du sol, ils augmentent le taux de recyclage, notamment la libération des éléments nutritifs comme l'azote.

Des différences significatives ont été observées entre la disponibilité du cuivre dans les turricules et dans le sol environnant. Quel que soit le biotope, la disponibilité en magnésium du sol environnant est similaire à celle des turricules, celle du zinc augmente très significativement entre les modalités alors qu'aucune différence significative n'est observée entre le sol environnant et les turricules. Ces résultats vont dans le même sens que ceux des travaux réalisés par Morgan & Morgan (1992) concernant le Cu, le Mg et le Zn dans le sol et dans les turricules. Leurs teneurs dans les turricules dépendent plus de l'élément considéré que de l'espèce lombricienne ou des conditions environnementales. Selon Helmke *et al* (1979), l'augmentation des teneurs en ETM dans les turricules corrélées à une augmentation de teneurs dans le sol signifie que ces ETM sont associés aux particules de sol ingérées par le ver comme, le Cu, le Mg et le Zn.

#### **3.3.4. Implication de la diversité des lombriciens à la gestion des agrosystèmes**

Les sols sablo-argileux de Bombo-lumeme et de tout le plateau des Batékés connaissent une baisse de fertilité et de rendement après la mise en culture. Ces sols cultivés sont caractérisés par une faible densité des vers de terre (Lee, 1985). Soumis à l'intensification de l'agriculture, ces sols perdent progressivement les valeurs agronomiques. La fragilité de ces sols a contraint les populations locales à pratiquer une agriculture itinérante, extensive et basée sur le brûlis de la végétation pour tenter d'améliorer les rendements. Cette technique s'avère de plus en plus inadaptée, d'une part aux impératifs de développement et d'autre part à la préservation de l'environnement.

Les résultats de cette étude mettent en évidence trois taxa lombriciens décomposeurs du bois. La diversité de ces décomposeurs dans les sols est faible. Cette faible diversité peut être associée aux activités agricoles intenses (Decaëns & Jimenez, 2002) et à la pauvreté naturelle des sols. En revanche, ces résultats ont montré que les lombriciens sont naturellement présents dans le sol et que les espèces *D. austeni*, *D. wenkei* et *D. tenuiseta* sont associés à la

dégradation du bois. Ces résultats ont une implication intéressante dans la fertilité et le cycle des nutriments du sol.

En effet, les lombriciens sont des espèces importantes des écosystèmes édaphiques. Ils ont les capacités de transformer leurs biotopes et même parfois de créer de nouveaux habitats pour d'autres organismes (Brown & Fragoso, 2007). Ils modifient la morphologie (modification de la stratification), la structure (porosité, stabilité...) et la composition du sol (taux de carbone, d'azote...) par leur action à la fois physique, chimique et biologique. Par l'ingestion de la matière organique et le rejet des turrículos, la fertilité du sol est ainsi augmentée et la croissance des plantes est stimulée (Toutain, 1987).

Etant donné que l'utilisation de fertilisants, de pesticides et d'herbicides, souvent indispensables pour l'agriculture, s'avère problématique pour des questions financières et écologiques, plusieurs voies de recherche permettant de pérenniser les cultures à faibles niveaux d'intrants sont actuellement développées parmi lesquelles l'intégration des processus naturels tels que le recyclage efficace des nutriments, la fixation de l'azote, le contrôle biologique naturel des parasites dans la conduite de cultures, une meilleure utilisation des potentiels biologiques et génétiques des plantes et des espèces animales.

Au regard de la pauvreté de ces sols et de la diversité des vers, un ajout de matière organique sur les sols cultivés et une inoculation des sols par les vers de terre identifiés lors de cette étude s'avère une opportunité pour la restauration des sols et l'augmentation de leur fertilité. En effet, les vers de terre sont à la fois des acteurs et des bio-indicateurs de la fertilité (Lavelle *et al.*, 2004). Un sol plus riche constituerait un milieu plus favorable au développement des vers de terre et à leur diversité. Ces résultats constituent dans ce contexte une piste intéressante pour l'amélioration et la gestion des agrosystèmes de Bombo-lumene et de tout le plateau des Batékés.

### **3.3.5. Conclusions**

La présente étude est un pas vers de futures expériences sur la problématique de la fertilité des sols du plateau des Batékés. La diversité de la faune des lombriciens décomposeurs a mis en évidence 3 espèces: *Dichogaster austeni*, *D. wenkei* et *D. tenuiseta*, inféodées à la forêt dense semi décidue et à la galerie forestière. L'étude confirme à la fois la complexité des activités des vers de terre et leur rôle bien connu dans la dynamique de la matière organique, mettant



en avant la richesse des turricules en carbone et en azote. Les turricules de ces vers sont plus riches en matière organique que le sol environnant. Le carbone, l'azote et les ETM ont été impacté par la biomasse des vers de terre et la complexité de leurs activités. Les vers de terre ont montré une sensibilité significativement différente au carbone, à l'azote et aux ETM selon le sol dans lequel ils évoluent. Ainsi, les conditions microclimatiques du sol, la disponibilité en matière organique et certains paramètres biotiques ont été clairement identifiés comme influençant les activités lombriciennes dans les biotopes.

### **3.4. Discussions générales**

#### **1.4.1. Biodiversité des communautés des communautés lombriciennes**

L'étude a recensée 10 taxa lombriciens dont 8 sont endémiques à la RDC et 2 sont distribuées dans les régions voisines. Cependant, Ouahrani (2003) et Baha (1997) en ont recensé chacun 11, Omodeo *et al.* (2003) en ont signalé 33 espèces au Maghreb. A Madagascar, en raison de son insularité, 33 espèces dont 20 exotiques et 13 endémiques ont été identifiées par Razafindrakoto (2012). Les valeurs faibles dans nos résultats par rapport à ces auteurs s'expliquent par la diversité des sites d'échantillonnage (Forêts, galerie forestière, recru forestier, savanes, sol sous culture) mais aussi par la variabilité des conditions climatiques et édaphiques.

En effet, l'ACC a confirmé que le pH, la température et l'humidité du sol peuvent influencent significativement la biodiversité, la distribution, l'activité et l'abondance des populations des lombriciens. Dans cette étude, les valeurs faibles de la densité et la biomasse des lombriciens et même de la diversité se trouvent dans les biotopes d'échantillonnage où les moyennes de pH, et d'humidité du sol sont également faibles. Il est vrai que ces biotopes sont en majorité anthropisés. Ces résultats sont en adéquation avec des études sur la dynamique des communautés lombriciennes exotiques dans des forêts d'Amérique du Nord sur sols acides qui ont montré que les rigueurs du climat empêchent la dispersion des vers de terre (Wirth, 2001).

### **1.4.2. Relation entre la structure écologique des lombriciens et les variables environnementales**

Les résultats obtenus dans cette étude permettent de regrouper les communautés lombriciennes en 3 catégories écologiques notamment les épigés, endogés et les anéciques. Les densités de différentes catégories écologiques discriminent fortement les biotopes d'une part en fonction du degré de dégradation de composantes nutritives et d'autre part, en fonction des variables climatiques et édaphiques.

Les vers épigés sont reconnus comme des espèces de litière et montrent des aptitudes liées aux sols avec des teneurs élevées en matière organique mais aussi en humidité. Cette catégorie est plus associée aux forêts denses semi décidues où la matière organique est abondante et l'humidité maintenue même dans les premiers centimètres du sol. Ces résultats s'approchent des travaux cités dans la littérature. Omodeo *et al.* (2003) décrivent les épigés comme des taxa confinés dans les biotopes organiques et relativement forestiers à substrats moins acides.

Cependant, les vers endogés sont caractéristiques de la galerie forestière et du recrû forestier. Ils sont généralement les plus abondants dans les sols humides à pH moins acide, ils possèderaient un pouvoir d'expansion extraordinaire lorsque les conditions leur sont favorables. Ces espèces lombriciennes sont reconnues comme étant moins sensibles à la disponibilité de nutriments superficiels en consommant principalement la fraction minérale du sol associée à la matière organique humifiée (Wyss & Glasstetter, 1992 ; Binet, 1993 ; Fragoso *et al.*, 1997).

Par ailleurs, les anéciques peuvent franchir avec succès les conditions sévères dans les biotopes suffisamment anthropisés. Ils se nourrissent de la litière et favorisent bien la dynamique du réseau alimentaire du sol. Ces derniers sont présents dans les sols des parcelles agricoles et dans les savanes, ils sont capables de nicher dans les couches profondes pour se protéger et résister contre les conditions sévères en développant des mécanismes de résistance notamment pendant la saison sèche. En outre, les anéciques peuvent côtoyer les milieux à faibles teneurs en matière organique et se corréler positivement à la variable température en s'opposant à l'humidité et au pH élevés.

Les résultats présentés ci-haut ont montré que la structure lombricienne est en étroite relation avec les paramètres abiotiques, corroborant ainsi les travaux de Satchell (1967), selon lesquels les températures, l'humidité et les facteurs du sol sont des clés régulateurs de l'abondance et l'activité des vers de terre en milieu naturel. Selon Sims et Gerard (1999), les populations lombriciennes répondent rapidement aux variations de ces facteurs environnementaux, leurs valeurs de la densité et biomasse fluctuent selon les conditions du milieu

#### **1.4.3. Relation entre les activités des lombriciens et les processus associés à la restauration des sols**

Les résultats de cette étude montrent que 3 espèces de vers de terre (*D. wenkei*, *D. austeni* et *D. tenuiseta*) ont été identifiées comme associées à la décomposition du bois au sein des biotopes. Cela a un impact sur la minéralisation du carbone et de l'azote et par conséquent sur la stabilité de la structure du sol. L'effet des vers de terre sur la minéralisation du carbone et de l'azote est bien connu, les lombriciens sont reconnus comme des régulateurs de l'activité des micro-organismes édaphiques, avec des impacts différents en fonction de l'espèce et du substrat (Hendrix *et al.*, 1992; Lavelle & Spain, 2001).

Il est cependant surprenant de constater d'une part que les vers décomposeurs n'ont côtoyés que la forêt dense semi décidue, la galerie forestière et le recrû forestier et d'autre part, ils n'ont peuplés et consommés significativement que les bois de *D. manii* et *P. eetveldeana*. En effet, les vers de terre choisissent les biotopes où les conditions sont les plus favorables à leur développement par conséquent, les biotopes anthropisés ne leur conviendraient pas. Le fait que les bois des *D. manii* et *P. eetveldeana* aient présenté des valeurs de diversité et d'équitabilité taxonomique significativement élevées signifierait un effet positif de l'attaque lombricienne relayée par *D. wenkei*, *D. austeni* et *D. tenuiseta*. A l'opposé, le fait que les bois de l'*H. acida* et du *D. englerianum* aient été peu peuplés en lombriciens traduirait leur forte durabilité due à la présence d'un duramen épais, ce qui limiterait les attaques des lombriciens.

Ces résultats sont en accord avec l'idée selon laquelle une forte redondance fonctionnelle existerait au sein des communautés lombriciennes. Des travaux récents s'intéressant aux lombriciens ont montré un effet de la diversité spécifique sur les processus de la décomposition de la matière organique (Scheu, 2003).

En outre, l'étude montre une différence entre la teneur en MO des turricules avec celle du sol voisin. Cela s'explique par les habitudes alimentaires des lombriciens car les espèces endogées et anéciques ont la particularité d'ingérer sélectivement un substrat riche en matière organique que le sol environnant (Lavelle, 1979).

Dans les biotopes, l'accumulation de la litière et sa décomposition différencient fortement les écosystèmes naturels des écosystèmes anthropisés. La forêt dense semi décidue se distingue des autres biotopes par des teneurs hautement significatives en C et N du sol et des turricules. Ces différences de concentrations de C et N seraient attribuables au type d'occupation du sol. Car, à différents niveaux, des facteurs extrinsèques agissent sur la formation et la stabilisation des sols et des turricules. Sous l'effet du climat par exemple, les processus de minéralisation sont inhibés au sein même des turricules (Doube *et al.*, 1994). Par ailleurs, Manley (1994) a constaté que la décomposition de la litière s'accompagne d'une augmentation de la teneur en C et N respectivement de 50 et 40 %. L'accumulation du carbone et de l'azote dans les déjections de vers de terre par rapport à un sol non ingéré dépend de la teneur en MO initiale du sol. la liaison étroite entre la matière organique et les lombriciens est confirmée par nombreuses études qui montrent une corrélation positive entre la densité et/ou la biomasse des lombriciens et la teneur en matière organique du sol (Hendrix *et al.*, 1992 ; Zhang & Schrader, 1993). Lee (1985) et Lavelle *et al.* (1998) confirment que les substrats à faibles teneurs en matière organique sont généralement pauvres en vers de terre. Ainsi, les valeurs les plus élevées se trouvent dans les biotopes forestiers riches en matière organique.

Concernant les éléments traces métalliques, des différences significatives ont été observées entre la disponibilité du cuivre dans les turricules et dans le sol environnant. Quel que soit le biotope, la disponibilité en magnésium du sol environnant est similaire à celle des turricules, celle du zinc augmente très significativement entre les modalités alors qu'aucune différence significative n'est observée entre le sol environnant et les turricules. Ces résultats vont dans le même sens que ceux des travaux réalisés par Morgan & Morgan (1992) concernant le Cu, le Mg et le Zn dans le sol et dans les turricules. Leurs teneurs dans les turricules dépendent plus de l'élément considéré que de l'espèce lombricienne ou des conditions environnementales. Selon Helmke *et al* (1979), l'augmentation des teneurs en ETM dans les turricules corrélées à une augmentation de teneurs dans le sol signifie que ces ETM sont associés aux particules de sol ingérées par le ver comme, le Cu, le Mg et le Zn.

# Conclusions générales

## 1. Synthèse des résultats

L'objectif de cette étude était d'évaluer les effets de l'occupation du sol sur la diversité taxonomique, la structure des communautés lombriciennes du sol et les processus fonctionnels associés notamment la décomposition de la matière organique. Pour atteindre cet objectif, la Réserve et Domine de Chasse de Bombo-lumene a été choisi pour deux raisons, notamment celle d'être accessible en toutes saisons et celle d'être constituée d'une collection d'écosystèmes exceptionnels, variés dont les sols présentent des modèles idéaux pour cette étude.

Les résultats obtenus par les approches méthodologiques développées dans cette étude permettent de confirmer les trois hypothèses émises au début de l'étude.

**H1** : Cette aire protégée très diversifiée sur le plan microclimat, sol et végétation, peut révéler une grande diversité lombricienne avec des espèces très adaptées dans les différents biotopes.

Les biotopes d'étude ont été choisis suivant un gradient d'intensification des activités anthropiques dans le but de comprendre les impacts induits par ces dernières sur la diversité et la densité de communautés lombriciennes. Les parcelles forestières étudiées sont caractérisées par des sols riches en nutriments naturels suite à des décennies de dépôts des débris végétaux qui jouent des rôles importants dans le fonctionnement des sols, contrairement aux parcelles situées dans les savanes et sous les cultures.

L'inventaire taxonomique a montré une grande diversité des communautés lombriciennes basée sur : (i) les caractéristiques morphologiques, (ii) le régime alimentaire associé et (iii) le biotope de prélèvement. L'étude a pu mettre en évidence 10 taxa dont 8 endémiques et 2 cosmopolites. La comparaison entre les biotopes, comme attendu, ceux considérés comme naturels ont montré d'importantes densités, diversités et richesses taxonomiques des communautés lombriciennes que ceux anthropisés. Ces descripteurs ont traduit la dépendance écologique des différentes espèces vis-à-vis des conditions pédoclimatiques régissant chacun des biotopes.

**H2** : les changements des conditions édaphoclimatiques induisent des modifications sur la densité, la composition, la richesse spécifique et la diversité au sein des populations des vers de terre et sur leur structure communautaire.

L'évaluation des effets de l'occupation du sol sur la structure des communautés lombriciennes telle que réalisée selon la catégorisation écologique a permis de comparer les descripteurs écologiques classiques, calculés pour les communautés échantillonnées dans les différents biotopes. Les résultats ont confirmé l'effet régressif induit par les changements d'occupation du sol sur les densités et la diversité des communautés.

En effet, une diminution de la densité totale de la communauté induite par des activités anthropiques a été observée dans les biotopes anthropisés. Par contre, les biotopes forestiers encore supposés naturels ont montré un important développement des lombriciens. Au sein des guildes écologiques, l'analyse factorielle des correspondances a permis de mettre en évidence que : (i) les vers épigés reconnus comme étant les plus sensibles à la mise en culture, à la prédation et aux piétinements, sont caractéristiques de la forêt dense semi décidue; (ii) les vers endogés, aussi très sensibles aux activités anthropiques que les épigés, sont reconnues comme étant moins sensibles à la disponibilité en nutriments superficiels car se nourrissant de la matière organique contenue dans le sol ont été caractéristiques de la galerie forestière et du recrû forestier. (iii) les vers anéciques ont une remarquable présence dans des systèmes anthropisés (savane arborescente, savane herbeuse et sol sous culture). En effet, leurs caractéristiques morphologiques et comportementales leur permettent de mieux résister aux contraintes anthropiques que les deux autres catégories écologiques.

**H3** : les activités lombriciennes ont des effets positifs sur l'amélioration des processus fonctionnels associés (décomposition de la matière organique).

Dans le but de mettre en évidence le rôle des activités lombriciennes dans les processus fonctionnels associés tels que la structuration du sol et la décomposition de la matière organique. L'étude s'est aussi intéressée à (i) l'identification des lombriciens associés à la décomposition du bois et (ii) à la comparaison des teneurs en matière organique et éléments traces métalliques entre les turricules et le sol environnant. Les descripteurs écologiques utilisés (densité, indices de diversité de Shannon et d'équitabilité de Piélou...) ont montré les mêmes effets partout que dans les travaux antérieurs. En effet, comme attendu, les

écosystèmes forestiers ont encore été plus favorables et mieux appropriés au développement des communautés lombriciennes. Trois espèces associées à la décomposition des essences ligneuses appartenant au même genre ont été identifiées à savoir *Dichogaster austeni*, *D. wenkei* et *D. tenuiseta*. Par ailleurs, les espèces *D. manii* et *P. eetveldeana* ont été considérées comme plus appétentes que l'*H. acida* et le *D. englerianum*. Il est à ce point intéressant de rappeler que les vers de terre par leurs actions mécaniques et biologiques, permettent une meilleure stabilisation et donc une meilleure conservation des produits de décomposition de la matière organique dans la partie minérale du sol.

Concernant la restauration de la fertilité, l'étude confirme le rôle des turricules en tant qu'interfaces chimiques réactives pouvant modifier la teneur en matière organique du sol quand bien même aucune différence significative n'a été observée entre les teneurs en ETM dans les biostructures et dans le sol voisin. L'acidification et la faible fertilité des sols du plateau de Batékés constituent un exemple qui illustre l'impact néfaste que les activités humaines peuvent générer sur les écosystèmes. Cet exemple témoigne de la dégradation de services écosystémiques induits par l'anthropisation. Mais le temps de résilience des sols peut être très long et demeure largement inconnu au plateau de Batékés. De ce fait, le recours à des méthodes de gestion forestière comme l'inoculation des lombriciens peut représenter une alternative intéressante pour restaurer durablement les services écosystémiques dégradés et anticiper la restauration de ces sols.

## 2. Perspectives

- Toutes les études ont été réalisées à l'échelle locale dans cette thèse. Il serait intéressant d'évaluer les diversités  $\beta$  et  $\gamma$  pour mieux comprendre l'impact de l'occupation du sol sur la diversité des communautés lombriciennes. Une étude à l'échelle régionale serait également intéressante pour mieux comprendre le pattern de distribution des espèces endémiques.
- Cette étude s'est basée sur la comparaison de paramètres sur les biotopes perturbés avec ceux considérés comme naturels. Pour la dynamique des espèces il est intéressant d'utiliser plusieurs biotopes perturbés et un échantillonnage à plusieurs reprises avant et après la perturbation.
- Il sied de continuer des études plus approfondies sur l'écologie de vers de terre endémiques et introduites.

## Références bibliographiques

- Anderson J.M., Ingram J. (1993). Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods, Oxford, CAB.
- Bachelier, G. (1978). La faune des sols, son écologie et son action, IDT N°38. ORSTOM, Paris, 391 pp
- Baha, M. (1997). The earthworm fauna of Mitidja, Alegria. Trop. Zool. 10: 247-254.
- Barois, I., Verdier, B., Kaiser, P., Mariotti, A., Rangel, P. & Lavelle, P. (1987). Influence of the tropical earthworm *Pontscolex corethrurus* (Glossoscoledae) on the fixation and mineralization of nitrogen. In Bonvicini, A. M, Omodeo, P., (eds). On Earthworms. Mucci, Bologna, Italy, 151-158pp.
- Barois, I. (1992). Mucus production and microbial activity in the gut of two species of Amyntas (Megascolecidae) from cold and warm tropical climates. Soil Biology and Biochemistry 24, 1507-1510 pp.
- Beddard, F. E. (1891). The classification and distribution of earthworms. Proc. Phys. Soc. Edinb., 10: 235-290.
- Beddard, F.E. (1901). On some species of earthworms of the genus Benhamia from tropical Africa. - Proc. Zool. Soc. London 1901(2): 190-206.
- Binet, F. (1993). Dynamique des communautés lombriciens et fonctions des lombriciens en sols cultivés tempérés. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 299p.
- Blanchart, E., Albrecht, A., Alegre, J., Duboisset, A., Gilot, C., Pashanasi, B., Lavelle, P. & Brussaard, L. (1999). Effects of earthworms on soil structure and physical properties. In: Lavelle, P., Brussaard, L. & Hendrix, P. (eds), Earthworm management in tropical agroecosystems. CABI, Wallingford, pp. 149-172.
- Blanchart, E., Albrecht, A., Brown, G., Decaens, T., Duboisset, A., Lavelle, P., Mariani, L. & Roose, E. (2004). Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion. Agriculture, Ecosystems and Environment 104, 303-315
- Bond-Lamberty, B., Wang, C. & Gower, S.T. (2004). A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? Global Change Biology 10, 1756-1766.
- Bouché M.B. (1972). Lombriciens de France. Ecologie et Systématique. I.N.R.A. (Ann. Zool.- écol. anim. Numéro hors-série 72/2), Paris, 671p.



- Bouché M. B. (1975). Action de la faune sur les états de la matière organique dans les écosystèmes. In : Kilbertus, G., Reisinger, O., Mourey, A. et Cancela da Foncesca, J. A. (eds), Humification et biodégradation. Pierron, Sarreguemines, pp. 157-168.
- Bouché M.B. (1977). Stratégies lombriciennes. Bull. Ecol., Paris, 25: 122-132.
- Bouché M.B. (1982). Ecophysiologie des lombriciens : acquis récents et perspectives. In: Proceedings of the VIII int. Colloquium of Soil Zoology. Le Brun et al (Editors). Ottignies - Louvain la Neuve, 321-333.
- Brown, G. & Fragoso, C. (2007). Listado de las especies de lombrices de tierra de América Central (Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá), las “Guyanas” (Surinam, Guyanne Française, Guyana), Venezuela y Paraguay, in: Minhocas Na América Latina: Biodiversidade e Ecologia. p. 421–452.
- Buckerfield, J.C., Lee, K.E., Davoren, C.W., & Hannay, J.N. (1997). Earthworms as indicators of sustainable production in dryland cropping in southern Australia. Soil Biochim, 29, 547-554.
- Burel F. & Baudry J. (2003). Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications. Editions Tec & Doc, 357p.
- BUTT K.R., 1998. Interactions between selected earthworm species: a preliminary, laboratory- based study. Appl. Soil Ecol., 9: 75-79.
- Chan, K. Y. (2001). An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils. Soil Tillage Res. 57, 179-191.
- Claus, C.F.E. (1880). Grundzüge der Zoologie 4th edn. Marburg, El wert Press. 821 pp.
- Cluzeau, D., Lebouvier, M., Trehen, P., Bouché, M. B., Badour, C. & Perraud, A. (1987). Relations between earthworms and agricultural practices in the vineyards of Champagne. Preliminary results. On Earthworms. Mucchi, Modena, pp. 465-484.
- Cluzeau D., Cannavacciuolo M. & Péres G. (1999). Indicateurs microbiologiques des sols : les lombriciens – Méthode d'échantillonnage dans les agrosystèmes en zone tempérée. In 12ème Colloque Viticole et Œnologique Ed. ITV Paris, p 25-35.
- Cluzeau, D., Guo, Z. T., Chaussod, D., Fedoroff, N., Normand, M. & Perraud, A. (1994). Interaction between soil, biological activities and organic matter enrichments in Champagne soils. Transactions of the XV World Congress of Soil Sc. INEG and CNA publishing, Mexico, 4b, pp. 149-150.
- Cluzeau, D., Blanchart, E., Peres, G., Ablain, F., Cuendet, G., Fayolle, L. & Lavelle, P. (2005). Faune du sol et Lombriciens dans les sols tempérés agricoles. In : Girard, M.-C.,

- Walter, C., Rémy, J.-C., Berthelin, J. et Morel, J.-L. (eds), Sols et environnement 2e cycle. Cours, exercices et études de cas. Paris, pp. 386-407.
- Colinet, G., Laroche, J., Toussaint, B. Goffaux, M.J., Martinez, M. & OGER, R. (2004). Base de données sols de REQUASUD. Deuxième synthèse. 36 p.
- Craswell, E.T. & Lefroy, R.D.B. (2001). The role and function of organic matter in tropical Soils. In Martius, C., Tiessen, H., Vlek, P.L.G., (eds). Managing matter in tropical Soils: Scope and Limitations. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands, 7-18pp.
- Csuzdi, Cs. (2010). A monograph of the Paleotropicalbenhamiinao earthworms (annelida: Oligochaeta, Acanthodrilidae). *PedozoologicaHungarica*, 6: 348p
- Curry, J. P. (1998). Factors affecting earthworm abundance in soils. In: Edwards, C. A. (eds), *Earthworm Ecology*. Boca Raton, St. Lucie Press, pp. 389.
- Curry, J.P. (2004). Factors affecting the abundance of earthworms in soils. In: C.A. Edwards (Ed.), *Earthworm ecology*. CRC Press LLC.
- Dajoz R. (2000). *Précis d'écologie*. Dunod, Paris, 615 p.
- Darwin, C. (1881). The formation of vegetable mould through the action of worms with some observations on their habits. Murray Eds, London.
- Decaëns T. (1999). Rôle fonctionnel et réponses aux pratiques agricoles des vers de terre et autres ingénieurs écologiques dans les savanes colombiennes. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 407p.
- Decaëns T. (2010). Macro ecological patterns in soil communities. *Global Ecol. Biogeogr.* 19, 3: 287- 302.
- Decaëns, T., Galvis, J.H. & Amezquita, E. (2001). Propriétés des structures produites par les ingénieurs écologiques à la surface du sol d'une savane colombienne. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris. Série III* 324, 465-477.
- Decaens T. & Jimenez J.J. (2002). Earthworm communities under an agricultural intensification gradient in Colombia. *Plant and Soil*, 240: 133-143
- Decaëns, T., Jiménez, J.J., Gioia, C., Measey, G.J. & Lavelle, P. (2006). The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology* 42, S23–S38.
- Decaëns, T., Margerie, P., Aubert, M., Hedde, M., & Bureau, F. (2008). Assembly rules within earthworm communities in North-Western France –A regional analysis. *Applied Soil Ecology* 39: 321-335.

- Decaëns, T., Porco, D., Rougerie, R., Brown, G.G. & James, S.W. (2013). Potential of DNA barcoding for earthworm research in taxonomy and ecology. *Applied Soil Ecology* 65, 35–42.
- Dikumbwa, N. (1990). Facteurs éco-climatiques sur les cycles biogéochimiques en forêt dense sèche zambézienne (Muhulu) du Shaba méridional. *Geo-Eco-Trop*, volume 14, N°1-4
- Doube, B.M., Buckerfield, J.C. & Kirkegaard, J.A. (1994). Short-term effects of tillage and stubble management on earthworm populations in cropping systems in southern New South Wales. *Aust. J. Agric. Res.*, 45: 1587-1600.
- Duchaufour, P. (1997). *Abrégé de pédologie : sol, végétation, environnement*. Paris: Masson.
- Edwards, C. A., Bohlen, P. J., Linden, D. R. & Subler, S. (1995). Earthworms in agroecosystems. In: Hendrix, P. F. (eds), *Earthworm ecology and biogeography in North America*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 185-213.
- Edwards C.A., & Bohlen P.J. (1996). *Biology and Ecology of earthworm* (3rd edition). Chapman and Hall, London.
- Edwards C.A. & Lofty J.R. (1977). *Biology of earthworms*. Second edition. Chapman and Hall, London, 300 p.
- Edwards, C.A. & Shipitalo, M.J. (1998). Consequences of earthworms in agricultural soils: aggregation and porosity. In *Earthworm ecology*, pp. 147-161. Edited by C. A. Edwards. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.
- EEW. (1994). *Etat de l'Environnement Wallon : Sol, climat, micro-organismes, tourisme*. Volume 1. L. bock Coord. Sci. Ministère de la Région wallonne. Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement. 1-122.
- Elliot, P.W., Knight, D. & Anderson, J.M. (1990). Denitrification in earthworm casts and soil from pastures under different fertilizer and drainage regimes. *Soil Biology and Biochemistry* 22, 601-605.
- Eriksen-Hamel, N. S. & Whalen, J. K. (2007). Impacts of earthworms on soil nutrients and plant growth in soybean and maize agroecosystems. *Agr. Ecosyst. Environ.* 120, 442-448.
- Evans A.C. & Guild W.J.M.C. (1948). Studies on the relationships between earthworm and soil fertility. V – Field populations. *Ann. Appl. Biol*, 35 (4):485-493
- Fittkan, E. J. (1997). Structural, Function and Diversity of Central Amazonian Ecosystems. In: *Natural Resources and Development*. Tübingen: Institute for Scientific Co-operation, 30-41 p.

- Folgarait, P.J., Thomas, F., Desjardins, T., Grimaldi, M., Tayasu, I., Curmi, P. & Lavelle, P. (2003). Soil properties and the macrofauna community in abandoned irrigated rice fields of northeastern Argentina. *Biology and Fertility of Soils* 38,349-357 pp.
- Fragoso, C., Brown, G. G., Patron, J. C., Blanchart, E., Lavelle, P., Pashanasi, B., Senapati, B. & Kumar, T. (1997). Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of earthworms. *Appl. Soil Ecol.* 6, 17-35.
- Fragoso, C., P. Lavelle, E. Blanchart, B. Senapati, J. J. Jiménez, M. De Los Angeles, T. Decaëns, & J. Tondoh. (1999). Earthworm Communities of Tropical Agroecosystems: Origin, Structure and Influence of Management Practices. Pages 27-55 in P. Lavelle, L. Brussard, & P. Hendrix, editors. *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*. CAB International, Wallingford, UK.
- Gijsman A.J. & Thomas R.J. (1995). Aggregate size distribution and stability of an Oxisol under legume-based and pure grass pasture in the Eastern Colombian savannas, *Aust. J. Soil Res.* 33, 153–165.
- Gobat, J. M., Aragno, M. & Matthey, W. (2003). *The living soil: basic pedology - soil biology* (2nd edition). Chapman and Hall, London, 569 pp.
- Gobat, J.M., Aragno, M. & Matthey, W. (2010) *Le sol vivant: Bases de pédologie, Biologie des sols*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Graham, R.C., Ervin, J.O. & Wood, H.B. (1995). Aggregate Stability under Oak and Pine after 4 Decades of Soil Development. *Soil Science Society of America Journal* 59(6), 1740-1744.
- Guénola P. (2003). Identification et quantification in situ des interactions entre la diversité lombricienne et la macro-bioporosité dans le contexte polyculture breton. Influence sur le fonctionnement hydrique du sol, Thèse présentée devant l'Université de Rennes 1. N° Ordre : 2806.
- Guggenberger, G., Thomas, R.J., & Zech, W. (1996). Soil organic matter within earthworm casts of an anecic-endogeic tropical pasture community, Colombia. *Applied Soil Ecology* 3, 263-274 pp.
- Guild, W. J. M. L. (1955). Earthworms and soil structure. In: Kevan, D. K. M. E. (eds), *Soil Zoology*. Butterworths, London, pp. 83-98.
- Habiyaremye M.F., Nlandu. L. & Malio N. (2011). Habitats de la Réserve et Domaine de chasse de Bombo-Lumene (R.D.C). *Lexique Kiteke des plantes observées dans ces milieux*. Institut Congolais pour la Conservaion de la Nature. 144p.

- Hamilton, W. E. & Sillman, D. Y. (1989). Influence of earthworm middens on the distribution of soil microarthropods. *Biol. Fertil. Soils* 8, 279-284.
- Hammer O., Harper, D.A.T., & P. D. Ryan. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9pp
- Hatcher, P.G., Breger, I.A., Szeverenyi, N. & Maciel, G.E. (1982). Nuclear magnetic resonance studies of ancient buried wood--II. Observations on the origin of coal from lignite to bituminous coal. *Organic Geochemistry*, 4(1), 9-18.
- Hedde, M., Lavelle, P., Joffre, R., Jimenez, J.J. & Decaëns, T. (2005). Specific functional signature in soil macro-invertebrate biostructures. *Functional Ecology* 19, 783-795.
- Hedde, M. (2006). Etude de la relation entre la diversité des macro-invertébrés et la dynamique de la matière organique des sols limoneux de Haute-Normandie. These Présentée à l'Université de Rouen, 208p.
- Hedges, J.I., Cowie, G.L., Ertel, J.R. (1985). Degradation of carbohydrates and lignins in buried woods. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 49, 701-711.
- Helmke P.A., Robarge W.P., Korotev R.L. & Schomberg P.J. (1979). Effects of soil-applied sewage sludge on concentrations of elements in earthworms. *J. Environ. Qual.*, 8 : 322-327.
- Hendrix, P. F., Muller, B. R., Bruce, R. R., Langdale, G. W. & Parmelee, R. W. (1992). Abundance and distribution of earthworms in relation to landscape factors on the Georgia Piedmont, USA. *Soil Biol. Biochem.* 24, 1357-1361.
- Hopp H. (1947). The ecology of Earthworms in cropland. *Proc. Soil Sci. Amer.*, 12: 503-507.
- Horst, R. (1894). On an earthworm from the Upper-Congo *Benhamia congica* n.sp. - *Tijdschr. Nederl. Dierk. Ver.* 4: 68-70.
- IUSS Working Group WRB. (2006). World reference base for soil resources 2006. 2nd edn. World Soil Resources Report No. 103. FAO, Rome.
- James, S.W. (1991). Soil, nitrogen, phosphorus, and organic-matter processing by earthworms in tallgrass prairie. *Ecology*, 72, 2101-2109.
- Jegou D. (1998). Rôle fonctionnel de quatre espèces lombriciennes dans la structuration du sol et dans les transferts de carbone. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 153 p.
- Jegou, D., Cluzeau, D., Hallaire, V., Balesdent, J. & Trehen, P. (2000). Burrowing activity of the earthworms *Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea giardi* and consequences on C transfers in soil. *Eur. J. Soil Biol.* 36, 27-34.

- Jegou, D., Brunotte, J., Rogasik, H., Capowiez, Y., Diestel, H., Schrader, S. & Cluzeau, D. (2002). Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. *Eur. J. Soil Biol.* 38, 329-336.
- Jiménez, J.J. & Lal, R. (2006). Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. CRPS.
- Jones, C. G., Lawton, J. H. & Shachak, M. (1994). Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69, 373-386.
- Kachaka S., Vanlauwe B. & Merckx R. (1993). Decomposition and nitrogen mineralisation of prunings of different quality. In: Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture. Mulongoy M. & Merckx R. (Eds), Leuven, 199- 208.
- Karousakis, K. & Coffee-Morlot, J. (2007). Financing Mechanisms to Reduce Emissions from Deforestation: Issues in Design and Implementation. Paris Cedex 16, France: OECD.
- Kasongo R.K., Van Ranst E., Verdoodt A., Kanyankogote P. & Baert G. (2009). Impact of *Acacia auriculiformis* on the chemical fertility of sandy soils on the Batéké plateau, D.R. Congo. *Soil Use and Management*, 25, 21-27.
- Koné A.W., Edoukou E.F., Orendo-Smith R. & Tondoh J.E. (2012b). Earthworms in *Chromolaena odorata* (L.) King and Robinson (Asteraceae) fallows along a chronosequence: Changes in community structure and identification of persistent and indicator species. *Pedobiologia*. 55: 193-201.
- Koy, K. (2010). Amélioration de la qualité des sols sableux du plateau des Batéké (RD Congo) par application des matériels géologiques et des déchets organiques industriels locaux. Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre. Université de GENT, 400p
- Kretzschmar A., & Aries F. (1990). 3D images of natural and experimental earthworm burrow systems. *Ecol. Biol. Soil*, 27: 407-414.
- Ladmirant, H. (1964). Carte géologique à l'échelle du 1/200 000. Notice explicative de la feuille Léopoldville. Serv. Géol. du Congo, Léopoldville.
- Lapied, E., Nahmani, J. & Rousseau, G.X. (2009). Influence of texture and amendments on soil properties and earthworm communities. *Applied Soil Ecology* 43(2-3), 241-249.
- Laroche, J. & Oger, R. (1999). Base de données sols de REQUASUD. Première synthèse. 36 p.
- Lavelle P. (1979). Relations entre types écologiques et profils démographiques chez les vers de terre de la savane de Lamto (Côte-d'Ivoire), *Rev. Ecol. Biol. Sol.* 16, 85–101.

- Lavelle P. (1981). Stratégie de reproduction chez les vers de terre. *Acta Oecol. Gener.*, 2: 117-133.
- Lavelle, P. & Pashanasi, B. (1989). Soil macrofauna and land management in Peruvian Amazonia (Yurimaguas, Loreto). *Pedobiologia* 22:283-291.
- Lavelle, P. & Martin, A. (1992). Small-scale and large-scale effects of endogeic earthworms on soil organic matter dynamics in soils of the humid tropics. *Soil Biology and Biochemistry* 24, 1491-1498.
- Lavelle P., Dangerfield M., Fragoso C., Eschenbrenner V., Lopez-Hernandez D & Pashanasi B. (1994). The relationship between soil macrofauna and tropical soil fertility. In Swift MJ, Wooller P. (Eds). *The biological management of tropical soil*. New York: John Wiley- Sayce, p. 137–169.
- Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, A. & Martin, S. (1993). A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica* 25, 130-150.
- Lavelle, P. (1997). Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research* 27, 93-132.
- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W. & Dhillon, S. (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology* 33(4), 159-193.
- Lavelle, P., Barois, I., Blanchart, E., Brown, G., Brussaard, L., Decaëns, T., Fragoso, C., Jiménez, J. J., Ka Kajondo, K., De los Angeles Martinez, M., Moreno, A., Pashanasi, B., Senapati, B. & Villenave, C. (1998). Les vers de terre, une ressource dans les agrosystèmes tropicaux. *Nature et Ressources* 34, 26-41.
- Lavelle P., & Spain A .V. (2001). *Soil ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 654p
- Lavelle, P. (2002). Functional domains in soils. *Ecological Research* 17, 441-450.
- Lavelle, P., Bignell, D., Austen, M., Brown, V., Behan-Pelletier, V.M., Garey, J., Giller, P., Hawkins, S., Brown, G. & St John, M. (2004). Connecting soil and sediment biodiversity: the role of scale and implication for management. In *Sustaining biodiversity and ecosystem services in soil and sediments*, pp. 193-224. Edited by D. H. Wall: Island Press.

- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P. & Rossi, J.P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *Eur J Soil Biol.* 42, Supplement 1, S3-S15
- Lebreton J.D., Chessel D., Richardot-Coul & M., Yoccoz N. (1988). L'analyse des relations espèces-milieu par l'analyse canonique des correspondances. II. Variables de milieu qualitatif. *Acta, Oecol. Gener.*, 9: 137-151.
- Lee K.E. (1959). The earthworm fauna of New Zealand. New Zealand Department of scientific and Industrial Research Bulletin, p 130-382.
- Lee, K. E. (1985). Earthworms: their ecology and relationship with soils and land use. New York, 411 pp.
- Lee K.E., Foster R.C. (1991). Soil fauna and soil structure. *Austr. J. Soil Res.*, 29:745-775.
- Lepage, M. (1979). La récolte en strate herbacée de *Macrotermes* aff. *Subhyalinus* (Isoptera : Macrotermitinae) dans un écosystème semi-aride (Kajiado-kenya). *Cahier de Recherche UIEIS société française- Lausanne* 7-8 sept.
- Lessedjina, K. (1970). Facteurs limitant la densité et l'activité d'*Hyperiodrilus africanus*, Beddard 1891 (Oligochète, Opisthopore. Eudrilidae) sous pelouse de *paspalum*. Mémoire inédit, Université Nationale du Zaïre, campus de Kinshasa. 149 p
- Llyod M. & Ghelardi M.J. (1964). A table for calculating the "equitability" comonent of species diversity. *J. Anim. Ecol.*, 33: 217-225.
- Lofs-Holmin, A. (1983). Influence of agricultural practices on earthworms (Lumbricidae). *Acta Agricult. Scand.* 33, 225-234.
- Mac Arthur R.H., Wilson E.O. (1967). Some generalized theorems of natural selection. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 48: 1893-1897.
- Manley, R. (1994). Jachère et gestion de la fertilité en Afrique de l'Ouest, suivi de quelques indicateurs agro-écologiques dans deux sites du Sénégal. Mémoire de DEA. Université d'Aix- Marseille: 69 p.
- Mayr, E. (1999). Systematics and the origin of species, from the viewpoint of a zoologist. Harvard University Press. 334 p.
- Mérelle F. (1998). L'analyse de terre aujourd'hui. GEMAS. Nantes. 184p.
- Michaelsen, W. (1890). Beschreibung der von Herrn Dr F. Stuhlmann im Müdungsgebiet des Sambesi gesammelten Terricolen. *Mitt. Mus. Hamburg*, 7: 1- 30.
- Michaelsen, W. (1892). Beschreibung der von Herrn DR F. Stuhlmann am Victoria Nyanzagesammelten Terricolen. *Mitt. Mus. Hamburg*, 92: 3-14.



- Michaelsen, W. (1896). Die Regenwürmer Ost- Afrikas. Die Tierwelt D.-Ost-Afrika Berlin, 4: 1-48.
- Michaelsen, W. (1915). Zentralafrikanische Oligochäten. Erg. Zweiten Dt. Zentral-Afr. Exp. 1910-1911, 1: 185-317.
- Michaelsen, W. (1931). Ausländische opisthopore Oligochäten. Zool. Jb. Syst., 61: 523-578.
- Michaelsen, W. (1936). Oligochäten von Belgisch- Kongo II. Rev. Zool. Bot. Afr., 28: 213-226.
- Milau, E. F., Kachaka S., Aloni K., Mvumbi M.& Francis, F. (2015). Incidence de la déforestation sur les catégories écologiques des vers de terre dans le domaine et Reserve de Chasse de Bombo-Lumene (Kinshasa), Tropicultura 2015, 33, 3, 209-217.
- Millenium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and human well-being, Synthesis, Disponible sur <http://millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Mora, P., Miambi, E., Jimenez, J.J., Decaens, T. & Rouland, C. (2005). Functional complement of biogenic structures produced by earthworms, termites and ants in the neotropical savannas. Soil Biology and Biochemistry 37, 1043-1048.
- Morgan J.E. & Morgan A.J. (1992). Heavy metal concentration in the tissues, ingesta and faeces of ecophysiologically different earthworm species. Soil Biol. Biochem., 24 : 1691-1697.
- Mulumba, L., (2004). Problématique de la conservation de la biodiversité animale dans la réserve naturelle de Bombo-Lumene en République Démocratique du Congo. Institut Pédagogique National (IPN), Kinshasa. 46 p.
- Naeem, S., Loreau, M. & Inchausti, P. (2002). Biodiversity and ecosystem functioning: the emergence of a synthetic ecological framework. In Biodiversity and ecosystem functioning: synthesis and perspectives. Edited by M. Loreau, S. Naeem & P. Inchausti. Oxford: Oxford university press.
- Nordstrom S. & Wdgren S. (1974). Environmental factors and lumbricid associations in southern Sweden. Pedobiologkz, 14, 1, 1-27.
- Nuutinen, V., J. Pitkänen, E. Kuusela, T. Widbom, & H. Lohilahti. (1998). Spatial variation of an earthworm community related to soil properties and yield in a grass-clover field. Applied Soil Ecology 8:85-94.
- Omodeo, P. (1954). Eudrilinae e octochaetinae della Costa d'ovorio (Oligochaeta) Mem. Mus. civ. St. nat. Verona, IV, 213-229.

- Omodeo P., Rota E. & Baha M. (2003). The megadrile fauna (Annelida: Oligochaeta) of Maghreb: a bio- geographical and ecological characterization. *Pedobiologia* 47: 458-465.
- Ortiz-Ceballos, A., & C. Fragoso. (2004). Earthworms populations under tropical maize cultivation: the effect of mulching with velvetbean. *Biology and Fertility of Soils* 39:438-445.
- Ouahrani G. (2003). *Lombrotechniques appliquées aux évaluations et aux solutions environnementales*. Thèse de doctorat d'État. Université Mentouri, 230 p.
- Paoletti M.G. (1999). The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1), 137-155.
- Phillipson, J., Abel, R., Steel, J. et Woodell, S. R. J. (1976). Earthworms and the factors governing their distribution in a beechwood. *Pedobiol.* 16, 258-285.
- Porte, B. (2011). Estimation de la biodiversité par une méthode simplifiée d'identification des arthropodes Approche paysagère à l'échelle du territoire viticole des Costières de Nîmes. Master: Sciences de l'Environnement Terrestre, présenté à Université Paul Cézanne / Aix - Marseille III, P 78.
- R Development Core Team (2014). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria
- Rafidison G.Z. (1982). Rôle de la faune dans l'humification: transformations des feuilles de hêtre par un ver anécique (*Nicodrilus velox*). Thèse de 3ème cycle en Agro-Eco-Pédologie, Nancy I.
- Raw F. (1959). Estimating earthworm populations by using formalin. *Nature (London)* 184: 1661- 1662.
- Razafindrakoto M. (2012). *Etude des Annélides Oligochètes de Madagascar: Taxonomie, Distribution et Ecologie*. Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, Madagascar, 174p.
- Razafindrakoto S. (2013). *Etude des interactions plante- vers de terre (Dichogaster saliens) dans les cultures de riz et de l'eleusine*. Memoire de master, Université Athenee Saint Joseph Antsirabe, Madagascar, 87p.
- Rougerie R., Decaëns T., Deharveng L., Porco D., James S.W., Chang C.-H., Richard B., Potapov M., Suhardjono Y. & Hebert P.N. (2009). DNA bar - codes for soil animal taxonomy. *Pesquisa Agrope - cuaria Brasileira* 44: 789-801.

- Rovira A.D., Smettem K.R.J., & Lee K.E. (1987). Effect of Rotation and Conservation Tillage on Earthworms in a Red-brown Earth under Wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 38: 829-834.
- Satchell J.E. & Lowe D.G. (1967). Selection of leaf litter in *Lumbricus terrestris*. In O. Graff & J.E. Satchell (eds). *Progress in Soil Biology*, Holland publishing company, Amsterdam, p: 102-109.
- Satchell, J. E. (1967). Lumbricidae. In: Burges, A. & Raw, F. (eds), *Soil Biology*. Academic Press, London, pp. 259-322.
- Satchell, J. E. (1980). 'r' worms and 'K' worms: a basis for classifying lumbricid earthworm strategies. In: Dindal, D. L. (eds), *Soil biology as related to land use practices*. Proc. 7th Intl Colloq. Soil Zool. Syracuse, Environmental Protection Agency, Washington D. C., pp. 848- 854.
- Scheu, S. (2003). Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiol.* 47, 846–856.
- Shannon C. E. (1948). « A Mathematical Theory of Communication ». In: *The Bell System Technical Journal* 27, p. 379–423, 623– 656
- Sims, R. W. & Gerard, B. M. (1999). *Earthworms*. FSC Publications, London, 167 pp.
- Soil Survey Staff. (2006). *Keys to soil Taxonomy*, 10th edition. Soil Conservation Service, USDA. Washington D.C.
- Spehn E.M., Joshi J., Schmid B., Alphei J. & Korner C. (2000). Plant diversity effects on soil heterotrophic activity in experimental grassland ecosystems. *Plant and Soil*. 224: 217–230.
- Staccioli, G., Stasiuk, L.D. & Mcmillan, N.J., (1997). Assessment of carboxyl groups of some Canadian Arctic fossil woods to evaluate their degradation. *Organic Geochemistry*, 27(718), 561-565.
- Stout, S.A., Boon, J.J. & Spackman, W., (1988). Molecular aspects of the peatification and early coalification of angiosperm and gymnosperm woods. *Geochimica, Cosmochimica Acta*, 52(2), 405-414
- Strehlow, K., Bradley J. S, Davis J., & Friend G. R. (2002). Short term impacts of logging on invertebrate communities in jarrah forests in south-west Western Australia. *Forest Ecology and Management* 162:165-184.
- Sys, C., A. Van Wambeke & J. Frankart. (1961). *La cartographie des sols au Congo. Ses principes et ses méthodes*. Publi. I.N.E.A.C., Série Scient. No. 66.

- Tiunov, A. V. & Scheu, S. (1999). Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow walls of *Lumbricus terrestris* L. (Lumbricidae). *Soil Biol. Biochem.* 31, 2039- 2048
- Toutain, F. (1987). Les Humus forestiers; biodynamique et mode de fonctionnement. Rennes: Centre régional de Documentation pédagogique, 49 p.
- Tran vinh, A. (1973). L'action des vers de terre, genre *Hyperiodrilus africanus*, sur quelques propriétés pédologiques d'un sol sablonneux de la région de Kinshasa (Zaire). *Cah. ORSTOM, série Pédol*, vol. XI, no 314, 1973: 249-256.
- Vancutsem, C. Pekel J.-F., Evrard C., Malaisse F. & Defourny P. (2006). Carte de l'occupation du sol de la République Démocratique du Congo au 1 : 3 000 000. Notice de la carte de l'occupation du sol de la RDC 4. Presses Universitaires de Louvain, Janvier 2006. UCL- Geomatics (Louvain-la-Neuve, Belgique) 2006. ISBN 2-87463-016-0 Dépôt légal D/2006/9964/6
- Vandewalle, M., De Bello, F., Berg, M.P., Bolger, T., Dolaareo, S., Dubs, F., Field, C.K., Harrington, R., Harison., P.A., Lavorel, S., Da silva, P.M., Moretti, M., Niemelao, J., Santos, P., Sattler,T., Sousa, J.P., Sykes, M.T., Vandergen, A.J., & Woodcock, B.A. (2010). « Functional traits as indicators of biodiversity response to land use changes across ecosystems and organisms » *biodiversity and conservation*, 19 (10)2921-2947.
- Wirth S.J. (2001). Regional-scale analysis of soil microbial biomass and soil basal CO<sub>2</sub> respiration in northeastern Germany. In: stott, D.E., Mothar, R.H., Steinhardt, G.D (Eds), *sustaining the global farm. Selected papers from the 10th international soil conservation organization meeting held May 24-29, 1999, west lafayette, IN*, pp. 486-493. Isco in ccooperation with USDA isco in cooperation with USDA and Purdue university, west lafayette, IN [online]. <http://topsoil.inserl>.
- Wolters, V. (2001). Biodiversity of soil animals and its function. *European Journal of Soil Biology* 37, 221-227.
- Wyss, E. & Glasstetter, M. (1992). Tillage treatments and earthworm distribution in a Swiss experimental corn field. *Soil Biology and Biochemistry.* 24, 1635-1639.
- Zhang, H. & Schrader, S. (1993). Earthworm effects on selected physical and chemical properties of soil aggregates. *Biology and Fertility of Soils.* 15: 229-234
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T.M., Miltner, A. & Schroth, G. (1997). Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79, 117-161.

## Annexes

### *Annexe 1. Quelques définitions utiles*

1. Annélides: Lignée d'invertébrés annelés qui comprend les Oligochètes (vers de terre), les Polychètes (vers marins comme les Nereis) et les Achètes (sangues). Egalement appelés « vers annelés », ce sont des vers au corps métamérisé (divisé en segments). C'est un vaste groupe de vers dont la majorité est des vers marins mais dont une notable proportion est terrestre ; quelques rares espèces sont parasites. Les vers de terre et les sangues sont bien connus et font partie de ce phylum dont les représentants varient de quelques millimètres à plus de un mètre de long! Les annélides comptent à la fois des espèces hermaphrodites et des espèces à sexes séparés.
2. Arthropode : élément d'un embranchement d'animaux invertébrés au corps annelé et articulé
3. Bio-indicateurs: Les indicateurs de biodiversité sont des outils d'évaluation de la biodiversité construits à partir de données descriptives (qualitatives, quantitatives) mesurées périodiquement et qui permettent de faciliter le suivi des évolutions relatives à la biodiversité.
4. Bioturbation : la bioturbation désigne la perturbation des couches du sol par les espèces animales
5. Blastopore : orifice de l'embryon au stade de la gastrula qui donnera la bouche chez les invertébrés
6. Clitellate. classe des annélides, regroupant les oligochètes et autres. Ces annélides possèdent un clitellum qui est un renflement de certains métamères du corps.
7. Clitellum : partie renflée des métamères du corps des vers. Ce clitellum secrète un cocon muqueux dans lequel sont déposés les œufs.
8. Cœlomate : animal pourvu d'un cœlome c'est-à-dire une cavité interne contenant les organes
9. Cœlome : cavité entre la paroi du corps et le tube digestif
10. Décomposition de la matière organique : elle est l'ensemble des transformations physiques et chimiques, réalisées par les actions conjointes des organismes et de facteurs abiotiques. Cet ensemble de transformations

est graduel : à chaque étape, la matière organique subit la même séquence de processus (lessivage, altération chimique liée au catabolisme des organismes, et réduction de la taille des particules) produisant ainsi de « nouvelles » ressources pour les séquences de transformations suivantes: (i) la minéralisation des éléments, correspondant à la conversion de la forme organique d'un élément en sa forme inorganique (CO<sub>2</sub>, nutriments minéraux) et à (ii) la formation de la matière organique du sol à travers l'humification. La formation de l'humus résulte de la transformation de la matière organique en composés organiques complexes. Ces derniers étant difficilement utilisables par les micro-organismes et ne pouvant être lessivés, l'humus a généralement un long temps de résidence dans les sols.

11. Détritivore : les détritivores sont des êtres vivants parmi lesquels on trouve les bactéries, les champignons, les vers de terre et autres invertébrés. Ils se nourrissent des débris végétaux.
12. Hermaphrodite : un individu qui a les organes de reproduction mâle et femelle
13. Hyponeurien : relatif à un animal dont la chaîne nerveuse est ventrale
14. Lombric : ver annélide, oligochète appelé communément ver de terre
15. Macrofaune : Désigne l'ensemble des animaux dont la taille est supérieure à deux
16. Macrofaune du sol : animaux (généralement macro invertébrés) de taille supérieure à 2 mm et vivant dans ou à la surface des sols : grandes larves d'insectes, majeure partie des Myriapodes, vers de terre. Ils peuvent modifier la structure physique du sol en creusant des galeries ou en ingérant la terre (on parle aussi d'ingénieurs du sol).
17. Métamère : anneau du corps, segment transversal d'un annélide
18. Oligochètes: Ce sont des animaux typiquement métamérisés, à symétrie bilatérale. Ils possèdent un petit nombre de soies qui ne sont pas portées par des parapodes. Les soies sont groupées en faisceaux au nombre de quatre par segment, deux latéraux-dorsaux et deux latéraux-ventraux. Les Oligochètes sont pourvus d'un vaste cœlome divisé en sacs cœlomiques, un par segment, par des cloisons issues de la paroi du corps, les septa. Le système nerveux est constitué d'un cerveau dorsal par rapport à la bouche, relié à une chaîne nerveuse

ventrale par une paire de commissures péri-pharyngiennes. Le tube digestif est complet avec une bouche et un anus. Le système excréteur est du type néphridien sans connexion avec l'appareil génital. Ce sont des animaux hermaphrodites qui possèdent des organes génitaux très différenciés. A maturité sexuelle l'épiderme des segments génitaux forme un bourrelet glandulaire, le clitellum, sécrétant un cocon qui protège les œufs après la ponte. L'appareil circulatoire est bien différencié et distinct du coelome.

19. Périprocte : dernier segment du corps d'un ver portant l'anus.
20. Protostomien : invertébré dont le blastopore de la gastrula donne la bouche et non l'anus. La bouche se forme en premier, de plus le système nerveux est en position ventrale.
21. Prostomium : parfois aussi appelé acron, est le premier segment du corps chez les vers annélides et s'oppose en position au périprocte.
22. Soie : poil minuscule située de chaque côté du corps du lombric
23. Tégument : c'est en général le tissu protecteur qui recouvre le corps d'un ver de terre ;  
peau, cuticule
24. Tumescence génitale : elles se situent dans la région du clitellum, sur la face ventrale du corps du ver. Elles ressemblent à des boutons blancs, leur nombre et leur position sont des caractéristiques distinctives d'un ver à un autre

*Annexe 2. Extrait des clés d'identification des espèces de vers de terre*

Genre	Espèce	Prostomium	Taille	Corps	Clitellum	Pores mâles/ femelles	Pores dorsaux
Benhamia	<i>Benhamia itoliensis</i>	Prolobique	130- 310mm	Brun, vert, bleu	circulaire (12) 13-23	18 / 14	5/6
Dichogaster	<i>Dichogaster wenkei</i>	Schizolobique	65-90mm	Brunâtre	en forme de selle 13-19 (20)	18/14	12/13
Dichogaster	<i>Dichogaster austeni</i>	Epilobique	75-110mm	brunâtre- verdâtre	circulaire 13-20	18/14	5/6
Dichogaster	<i>Dichogaster savanicola</i>	Prolobique	60-102mm	brun rougeâtre	circulaire 13-20	18/14	5/6
Dichogaster	<i>Dichogaster tenuiseta</i>	Epilobique	40-120mm	brunâtre	circulaire 13-20, 1/2 (21)	18/14	5/6
Dichogaster	<i>Dichogaster congica</i>	Prolobique	80-100mm	brun	en forme de selle 13-19,20	18/14	5/6
Dichogaster	<i>Dichogaster stuhlmanni</i>	Epilobique	40-140mm	grisâtre	circulaire 13-20	18/14	5/6
Dichogaster	<i>Dichogaster silvestris</i>	Epilobique	35-60mm	brun rougeâtre	circulaire 13-20,1/2 (21)	18/14	5/6
Dichogaster	<i>Dichogaster navana</i>	schizolobique	75-80mm	brunâtre	circulaire 13-19	18/14	5/6
Hyperiodrilus	<i>Hyperiodrilus africanus</i>	Epilobique	100- 160mm	rougeâtre	-	17/14	9/11



*Annexe 3. Quelques photos prises sur le terrain*



*Photo 1. Dichogaster congica*



*Photo 2. Dichogaster tenuiseta*



*Photo 3. Dichogaster wenkei*



*Photo 4. Dichogaster savanicola*



*Photo 5. Dichogaster austeni*



*Photo 6. Hyperiodrilus africanus*



*Photo 7. Benhamia itoliensis*



*Photo 8. Dichogaster silvestris*



*Photo 9. Dichogaster shulmanni*



*Photo 10. Dichogaster navana*

**Annexe 4. Faune de la Réserve et Domaine de Chasse de Bombo-lumene**

Famille	Noms scientifiques	Noms vernaculaires
<b>Faune mammalienne</b>		
Bovidae	<i>Syncerus caffer</i>	Buffle de savane
Suidae	<i>Potamochoerusporcus</i>	Potamochère à pinceau
Hippopotamidae	<i>Hyppopotamusamphibius</i>	Hippopotame
Bovidae	<i>Tragelaphus scritus</i>	Guib harnaché
Bovidae	<i>Cephalophus sylvictor</i>	Céphalophe à dos jaune
Bovidae	<i>Tragelaphus spekei</i>	Sitatunga
Sciuridae	<i>Xerus rutilus</i>	Ecureuil fouisseur
Canidae	<i>Canis adustus</i>	Chacal à flancs rayés
Viverridae	<i>Genetta trigina</i>	Genette tigrine
Viverridae	<i>Viverracivetta</i>	Civette d'Afrique
Varanidae	<i>Veranusniloticus</i>	Varan du Nil
<b>Faune reptilienne</b>		
Pythonidae	<i>Python sebae</i>	Python de seba
Viperidae	<i>Bitis anetans</i>	Vipère hurlent
Viperidae	<i>Bitis gabonica</i>	Vipère du Gabon
Elapidae	<i>Naja nigricollis</i>	Cobra cracheur à cou noire
Elapidae	<i>Dendroaspis jamesoni</i>	Mamba vert de Jameson
Pelomedusidae	<i>Pelusios subniger</i>	Tortue
<b>Faune ichtyologique</b>		
Mormyridae	<i>Gnathonemus petersii</i>	Poisson éléphant
Clariidae	<i>Clarias sp.</i>	Poisson chat
Mormyridae	<i>Mormyrus macrodon</i>	Poisson éléphant
Hepsitidas	<i>Hepsetusodoe</i>	Brochet africain
Alestiidae	<i>Brycinusopisthotaenias</i>	-
Bagridae	<i>Parauchenon glanisguttatus</i>	Catfishes
Cichlidae	<i>Nanochromis sp</i>	-
Anabantidae	<i>Caudifasciatus sp.</i>	
Anabantidae	<i>Ctenopoma kingsleyae</i>	Ctenopoma de kinsley

Cyprinidae	<i>Barbuscallipterus</i>	Barbodes
Ariidae	<i>Arius hendelotti</i>	Poisson chat
<b><i>Faune aviaire</i></b>		
Columbidae	<i>Streptopeliadecipiens</i>	Tourterelle pleureuse
Columbidae	<i>Streptopeliavinacea</i>	Tourterelle vineuse
Caprimulgidae	<i>Caprimulgus climacurus</i>	Engoulevent
Phasianidae	<i>Francolinuslathamii</i>	Francolin commun
Numididae	<i>Numidameleagris</i>	Pintade commune
Accipitridae	<i>Milvusmigrans</i>	Milan noir
Alcedinidae	<i>Cerylerudis</i>	Martin pêcheur pie
Alcedinidae	<i>Halcyon chelicuti</i>	Martin chasseur strié
Musophagidae	<i>Corythaeolacristata</i>	Toucarogéant
Cuculidae	<i>Centropussenegalensis</i>	Coucal du sénégal
Otididae	<i>Neotis denhami</i>	Outarde de Denham
Threskiornithidae	<i>Bostrychiahagedash</i>	Ibis hagedash
Charadriidae	<i>Vanellussenegallus</i>	Vanneaucaronculé
Ardeidae	<i>Ardeacinerea</i>	Heron cendré
Ciconiidae	<i>Ciconiaabdimii</i>	Cicogned'Abdim
Bucerotidae	<i>Tockus sp.</i>	Calao
Accipitridae	<i>Haliaeetusvocifer</i>	Aigle pêcheur
Ploceidae	<i>Pioceussp.</i>	Tisserin